

MTA Számítástechnikai és Automatizálási Kutató Intézet Budapest



MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA
SZÁMITÁSTECHNIKAI ÉS AUTOMATIZÁLÁSI KUTATÓ INTÉZETE

FORGÁCSOLÓ MEGMUNKÁLÁSOK FOLYAMATAINAK OPTIMÁLÁSI
ÉS IRÁNYÍTÁSI PROBLÉMÁI

Irta:

SOMLO JÁNOS

Tanulmányok 136/1982

A kiadásért felelős:

DR VAMOS TIBOR

ISBN 963 311 144 7

ISSN 0324-2951

Jelen tanulmány a szerző
kandidátusi disszertáció -
ja alapján készült.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Az alkatrészgyártás folyamatai tervezésének és irányításának fő fejlődési irányai	6
1.1 A gépgyártástechnológia fejlődésének meghatározó tendenciái	6
1.2 Az értekezés célja és témakörének behatárolása	17
2. Forgácsolási folyamatok optimálása	19
2.1 Forgácsoló megmunkálások determinisztikus matematikai modelljei	20
2.1.1 A feltételrendszerek	21
2.1.2 Célfüggvény	39
2.1.3 Éltartam összefüggés	49
2.2 Elsődleges optimálás determinisztikus modellek alapján	62
2.2.1 Optimálási módszerek	64
2.2.1.1 A "gazdaságos" éltartamról	66
2.2.1.2 Az optimálás klasszikus módszere	69
2.2.2 A technológiai adatok optimálásának általános módszere	84
2.2.2.1 Optimumkeresés rögzített fogásmélység mellett	85
2.2.2.1.1 Az optimálás algoritmusai	90
2.2.2.1.2 Az optimálás kézi vagy zsebkalkulátoros módszerei	94
2.2.2.1.3 Számítógépes optimálási módszerek	104
2.2.2.2 Paraméteres optimálás. Nomogramok forgácsolási adatok meghatározására	112
2.2.2.2.1 A paraméteres optimálás egyéb esetei	122
2.2.2.3 Optimálás más matematikai modellek esetében	133
2.3 Magasabb szintű optimálási módszerek. Másodlagos optimálás	134

2.3.1 A másodlagos optimálás matematikai modellje	141
2.3.2 Másodlagos optimálási módszer	150
2.2.3 Másodlagos optimálás diszkrétén változó forgácsolási sebességek esetében	160
2.3.4 Optimálás a legnagyobb nyereségre	161
3. Termelési rendszerek és optimálási problémáik	175
3.1 A termelésirányítás hierarchikus szintjei	181
3.2 Az alkatrészgyártás technológiai tervezésének hierarchikus szintjei	188
3.3 Az alkatrészgyártás technológiai tervezésének szintjei és optimálási problémáik	193
3.3.1 Műveleti sorrend-tervezés	193
3.3.2 Művelettervezés	199
3.3.3 A műveletelem tervezési szint optimálásának helye a technológiai tervezési folyamat hierarchiájában	201
3.3.4 Fogásosztás optimálása	208
3.4 A termelésirányítás és a technológiai tervezés szintjének kapcsolatai	216
3.4.1 Egy integrált termelésprogramozási és technológiai tervezési rendszer és optimálási problémái	223
4. Forgácsolási folyamatok visszacsatolt rendszerei /technológiai AC/ és optimálási problémák	229
4.1 A forgácsolási folyamat szabályozása	232
4.2 Adaptív irányítási stratégiák	232
4.2.1 Egyszerű ACC-rendszerek	248
4.2.2 Több szabályozó körös ACC-rendszerek	250
4.2.3 A technológiai adatok optimálása ACC-rendszerek alkalmazásakor	253
4.2.4 Optimáló adaptív irányítási rendszerek	262
4.2.4.1 Egy lehetséges optimáló adaptív /ACO/ irányítási stratégia	266
4.2.5 Szerszámgépek adaptív irányításának alkalmazása. Helyzetkép	273

5. Hierarchikus gépipari rendszerek, optimálásuk és a szerszámgépek irányításának kapcsolatai	279
5.1 Egy új felülbirálási /override/ elv	285
Függelék	
2.1 Az egyes szakaszok lokális szélsőérték pontjainak meghatározása	291
2.2 A szélsőérték pont unicitása	295
2.3 Másodlagos optimálás	299
3.1 A fogásosztás optimálása dinamikus programozással	306
Irodalom	311

1. Az alkatrészgyártás folyamatai tervezésének és irányításának fő fejlődési irányai

1.1. A gépgyártás-technológia fejlődésének meghatározó tendenciái

"A gépgyártás-technológia fejlődési irányainak prognózisa 2000-ig" című OMFB tanulmány [1.1], összegezve az elemzések többségében előfoduló véleményeket, a technológia fejlődésének általános vonásairól a 80-as, 90-es években, a következőket írja:

"- Egy-egy technológiai szakágazaton belül nem várható gyökeresen új, forradalmi változás, lényegesen új eljárások megjelenése,
- hanem az egyes technológiáknak hatékony gyártórendszerbe történő összekapcsolása, az automatizáltság növekedése,
- a gyártórendszerek jobb megszervezése,
- és a rendszerekben alkalmazott technológiák egymáshoz képesti, a gyártandó termékek sajátosságaihoz jobban illeszkedő, helyesebb aránya fogja adni a fejlesztés lényegét."

Vizsgáljuk meg kicsit részletesebben a technológia fejlődésének ezt az irányát és következményeit.

A gépipari alkatrészgyártás és ezen belül különösen a forgácsoló megmunkálás a világon hatalmas

értékeket termel. A forgácsolással megteremtett értékek például az Egyesült Államokban évente csak 100 milliárd dolláros nagyságrendekben mérhető.

A világ forgácsoló szerszámgép termelésének értéke 1980-ban 20 milliárd \$ felett volt. /USA - 3780,0; NSZK - 3257,3; Japán - 3001,0; Szovjetunió - 2410,0 milliárd \$ stb./

A gépipari termelés zömét azonban nem az új, korszerű gépek nyújtják, hanem a sok év alatt kialakult, részben régi gépekből álló gyártóegységek. A termelő helyek műszaki fejlődését az időről időre megjelenő új igények és az adott pillanatban meglevő lehetőségek szabják meg. A lehetőségek sokoldalúak és nemcsak az egyes műveletek magasabb szintű ellátását oldhatják meg, hanem kihatnak a termelés és értékesítés rendszerének valamennyi részére és ennek egészére.

Közhelyként említhető meg a hagyományos szerszámgépekkel üzemelő vállalatoknál az NC gépek megjelenésének példája, amelyek a leglényegesebb szűk keresztmetszetek feloldásával megszabhatják a termék kibocsátásának ütemét, jelentősen gyorsítva ezt. Közvetlen hatásukon kívül új gyártáselőkészítési módszerek alkalmazását is szükségessé teszik és ezen, valamint több más tényezők keresztül a termelés egész rendszerét gyökerében befolyásolják.



A jelenleg évi 20 milliárd \$ körüli forgácso-
ló eszköz folyamatos begyűrűzése a termelésbe gyö-
keresen átalakítja a termelő rendszereket. Ennek so-
rán, megint a fent említett OMFB tanulmányból idéz-
ve: "Az iparilag legfejlettebb országokban tovább-
ra is a gépipar technológiájának legátfogóbb tenden-
ciája a teljes gyártási folyamatot felölelő auto-
matizálás lesz. A kevésbé tőkeerős országokban ez
a tendencia még nagyobbbrészt 'alulról fölfelé',
vagyis a fokozatos automatizálás útján érvényesül.
Az automatizálás kulcskérdése a digitális mikroelekt-
ronika gyors behatolása a gépgyártásba."

A legfejlettebb ipari országokban megteremtő-
dött a lehetősége - a gyártmány- és gyártásterve-
zés, a termeléstervezés és -irányítás, és a gyár-
tási folyamat irányítás részrendszereiből - magas
szinten automatizált speciális célokat szolgáló,
vagy flexibilis gyártórendszerek kialakításának.

Ezek jellemzője az anyag- és adatfeldolgozás
integrálódása. Ahogy az anyagfeldolgozás kulcské-
rdése a mikroelektronika gyors behatolása a gyártás-
ba; ugyanugy az adatfeldolgozás kulcskérdése a leg-
különbözőbb szintű számítástechnikai eszközök gyors
teljesítőkéesség növekedése és széles körű alkal-
mazásuk feltételeinek kialakulása.

A vázolt tendenciának több fontos következménye van. Például:

- Az automatizált rendszerek értéke "nagy", ezért optimális működésüknek a jelentősége fokozódik. Más megvilágításban: a tőke szerves összetétele a gépiparban rohamosan változik, ami a termelőeszközök optimális kihasználását gazdasági szükségyszerűséggé teszi.

- Az egyes részrendszerek automatizálása maga után vonja továbbiak automatizálását, mert egyébként hatékonyságuk nem érvényesülhet. Ennek megfelelően általános törekvés a részrendszerek optimálását az egész rendszer optimálásának célját szolgálóan megoldani [1.3].

- Az automatizálás - tehát az emberi beavatkozástól való függetlenítés - szükségessé teszi a gyártó berendezésekbe olyan új elemek beépítését, amelyek lehetővé teszik a folyamatokat ért zavarások ellenére az eredményes működést. Ez indokolja a számgépek automatikus ellenőrzési /monitor és diagnosztikai/, valamint adaptív irányítási eszközökkel való ellátását.

A gépgyártástechnológia fejlődésének tendenciáival foglalkozva a CIRP, valamint az SME /Amerikai Gépgyártástechnológiai Egyesület/ Delphi módszer-

rel készült előrejelzéseket készített [1.4, 1.5].

Ezeknek a legfontosabb tanulságai beépültek az

[1] OMFB tanulmányba is.

Igy a jelen disszertáció írója abban a kellemes helyzetben van, hogy hivatkozhat egy olyan anyagra a gépipari gépgyártástechnológia nemzetközi és hazai fejlődésével kapcsolatban [1], amely várhatólag jelentős hatásu lesz a területen folyó hazai kutató-fejlesztő munkákra. E helyen célszerűtlen ismertetni az előrejelzések nyújtotta teljes képet. Azonban célszerű összefoglalni a jelen munka tárgykörét érintő legfontosabb tényezőket.

a/ Mint említettük, a gépipari technológia legátfogóbb tendenciája a széles körű automatizálás és a részrendszerek, résztvékenységek nyereség-orientált rendszerré integrálódása.

b/ Az automatizálás és a nyereség-orientáltság egyik belső velejárója az explicit módon megfogalmazott, vagy rejtettebb formában jelentkező optimálás.

c/ Az egyik megoldandó alapprobléma a forgácso-lási adatok optimálása. Ez az egyik kulcskérdés, amelyen a nyereségesség, a szerszám, energia takarékoság stb. nyugszik. Az automatizálás és az egyes

technológiai szintek integrálódása elképzelhetetlen ennek a legalsó szinten levő problémának a magas szintű megoldása nélkül.

Vizsgáljuk kicsit részletesebben ezt a tényezőt.

A probléma elméleti megoldásai már a klasszikus eredmények között is ismeretesek. Mégis a fejlődés, a változó követelmények új meg új aspektusait juttatják előtérbe.

Egyik oldalról; megteremtődtek a lehetőségei olyan számítási módszerek alkalmazásának, amelyek a közvetlen üzemi gyakorlat során kalkulátorok és/ vagy nomogramok segítségével, fejlettebb változatok esetében kisszámítógépes vagy terminál üzemű kiszolgálással, lehetővé teszik a tudatos alapokon nyugvó megmunkálást. Ez azt jelenti, hogy számszerűsíthetővé válnak a költségtényezők, az időjellemzők, a szerszámfelhasználások stb.

Másik oldalról a forgácsolási adatok nem mint önálló tényezők jelennek meg, hanem beépülnek az integrálódás során a magasabb rendű tervezési problémák megoldásaiba. Egyik részről megjelennek mint az alkatrészgyártás tervezés /a műveleti sorrend, a művelet, a műveletelem tervezés, szerszám-, anyagfolyam tervezés stb./, másik részről mint a termelésirányítás /termeléstervezés, ütemezés, programozás, szerszám-, anyagfolyam irányítás stb./ alkotó elemei.

Az előrejelzések mindkét irányzat jelentős előrehaladását jelzik már erre az évtizedre.

A széles körű alkalmazás feltételei közül a számítási eszközök és módszerek a legfejlettebb országokban rendelkezésre állnak és egyre inkább elérhetővé válnak kevésbé fejlett körülmények között is.

A legnagyobb probléma az, hogy a jelen pillanatban általában nem áll rendelkezésre olyan mennyiségű és minőségű információ a megmunkálhatóságra és megmunkáló képességre vonatkozóan, amely alkalmas lenne az egyre változatosabb és egyre fokozódó igények kielégítésére.

Ez a felismerés indokolja azokat a világszerte folyó munkákat, amelyeket technológiai adatbankok létrehozására folytatnak. - Erről részletesebben kissé alább lesz szó.

d/ A termelés részrendszereinek nyereség-orientált rendszerre integrálódása szükségessé teszi célul tűzni az egész rendszer optimálását. Ez nagyon sokrétű feladat, hiszen számos esetben a részrendszerek problémái még megfelelő mélységben megfogalmazva sincsenek.

Kevés irodalmi eredmény ismeretes az ilyen komplex rendszerek rendszerteknikai és optimálási problémáiról.

Ugyanakkor az igény élesen jelentkezik. A gyakorlatban megjelennek az automatizált, integrált gyártórendszerek, amelyek lényegüknél fogva igénylik a tudatos cél szerinti, összehangolt működést /optimálást/. Másik oldalról az élesedő verseny, az igények gyors változása, az anyag- és energiatakarékosság, a gépipari termelés minden formájánál szükségessé teszi hasonló szempontok érvényesítését az adott körülmények megszabta keretek között.

e/ A technológiai adatok optimálása olyan mértékben lehet sikeres, amilyen jók az alapadatok, információk, amelyeken nyugszik.

Széles körben alkalmazható adatok meghatározására és szolgáltatására világszerte jelentős erőfeszítések folynak. Ezt a célt szolgáló rendszerek a világ sok országában működnek. Ilyenek például az INFOS /NSZK/, METCUT /USA/, ADEPA /Franciaország/, PERA /Nagy-Britannia/, az NDK-ban a KOFA rendszert alkalmazzák, több szovjet technológiai információs rendszer is ismeretes, nagy szerszámgyártó cégek is rendelkeznek hasonló lehetőségekkel.

Az előrejelzések még erre az évtizedre tartják várhatónak a közhasználatu technológiai adatbank szolgáltatások elterjedését [1.5].

Ugyanakkor ennek komoly akadályai is vannak.

┐

Jelentős adatmennyiségek vannak vállalati birtokban, amelyek elterjedését vállalati, konkurrenciaérdekek gátolják. A nemzetközi információcserének szintén vannak hasonló és hadászati szempontu akadályai is. Az MKGS rendszer elemeinek bizonytalanságai esetenként lehetetlenné teszik használható adatok felderítését. A vizsgálandó esetek változatossága olyan új és új feladatokat vet fel, amelyek nem fedhetők le az eddigi vizsgálatok alapján stb.

f/ Az automatizálás sokoldalú, igényes biztonsági követelményeket vet fel a megmunkálási folyamat közvetlen környezetében. Ez egyrészt megjelenik az eszközök és az üzemvitel irányában megnyilvánuló fokozott követelmények alakjában. Másrészt, új elemek gyanánt, szükségessé teszi a folyamatok ellenőrzését, diagnosztizálását, szabályozását.

A megmunkálási folyamatok ellenőrzésének és szabályozásának egyik legnehezebb problémája a folyamatjellemzők megbízható érzékelése. Az előrejelzések /bár az árviszonyok körül komoly kételyek vannak/ már a jelen évtized közepére széles körben elérhető, megbízható érzékelők megjelenését /elterjedését/ várják.

Azoknak a szabályozási feladatoknak egy részét, amelyek közvetlenül az anyagformálási folya-

mat közelében vannak /geometriai és technológiai AC/, az előrejelzések külön sullyal kezelik és stratégiai problémáik megoldását, széles körű gyakorlati alkalmazásba vételüket szintén a jelen évtizedre jósolják.

g/ Az eddig vázoltak alapján világos, hogy a széles körű automatizálás és a gyártórendszerre integrálódás két elkülöníthető uton fejlődik.

Az egyik a részproblémák magas szintű /leginkább számítástechnikai eszközökkel megoldott/ automatizált megoldása. Ilyenek a termelésirányítás, a gyártástervezés, a megmunkálási folyamat irányítás /vezérlés, ellenőrzés, diagnosztika, monitorizálás, szabályozás /geometriai, technológiai AC/ stb./.

A másik az alrendszerek automatizált együttműködésével kialakított integrált rendszerek /gyártócellák, flexibilis rendszerek, integrált információ- és anyagfeldolgozó rendszerek/ fejlődése.

A kétirányú fejlődés egyidejű. Egymásra hatásukat az előrejelzések éreztetik. A probléma szakmai feldolgozása azonban rendkívül hézagos.

A legprogresszívebb alkalmazások gyakorlati példát mutatnak a probléma megoldására. Megjelentek a második, harmadik műszakban közvetlen emberi felügyelet nélkül működő megmunkáló központok, rend-



szerek /Kearnay and Tracker, Makino, a Fujitsu Fanuc automatizált gyár stb./ Ezek - a legkülönbözőbb konkrét körülmények között - integrálják a magas szinten automatizált alrendszereket. Mivel a nagy termelékenységű, rugalmas rendszerek előnyt biztosítanak a gazdasági versenyben az alkalmazóknak, a szakmai megoldások ritkán kerülnek nyilvánosságra. Pontosabban, mivel a berendezések, a rendszerek mint áru is megjelennek, a reklám információ, a "mit" gyakran megjelenik, de a "hogyan" sokszor háttérben marad.

A jelen összefoglalásban nem tértünk ki többek között a gyártás jellegének változásaira, a gépek, a vezérlési eszközök fejlődési tendenciáira és hatásukra, a szerkezeti anyagok, a szerszámok változásaira, a konstrukciós, technológiai és termelés tervezés fejlődésére.

Napjainkban kirajzolódnak a jövő gépipari termelésének körvonalai, ahol az anyag, eszköz és energiatakarékosság szigorú szempontjainak korlátai között, változó igényekhez és feltételekhez alkalmazkodni képes, a korszerű és meglevő eszközöket célszerűen összeszervező, a folyamatokat tudatosan kézben tartó és kiértékelő, nyereségorientált, versenyképes egységek alakulnak ki.

1.2 Az értekezés célja és témakörének behatárolása

A fejlődés előző paragrafusban vázolt trendjei meghatározzák a gépipari kutató-fejlesztő munkák fő irányait.

A jelen értekezés a rendkívül széles témakörből egy szűk, összefüggő területtel kíván foglalkozni. Ez a témakör: a megmunkálási folyamatok optimalálása.

Az értekezés célja az optimalálási probléma átfogó vizsgálata. Ezen belül a forgácsoló megmunkálási folyamatok azon feladatainak egy részével foglalkozik, amelyek az alak-kialakítással és ennek közvetlen környezetével kapcsolatosak. Mivel a folyamatnak ez a része az értékteremtés szempontjából döntő jelentőségű, az optimalálási problémák megfogalmazása és megoldása szintén nagyfontosságu.

A témakör alulról felfelé /bottom up/ való megközelítését alkalmazva a munka foglalkozik:

- a műveletelemek forgácsolási adatainak optimalálásával,
- az optimalálás alkalmazásának módszereivel,
- a forgácsolási adatok beillesztésével magasabb-szintű, tervezési és termelésirányítási alrendszerek optimalálási feladatainak megoldásába,
- visszacsatolt rendszerek /technológiai AC/ alkalmazásával a folyamatok bizonytalanságai hatásának csökkentésére,
- az optimalálás problémájával visszacsatolt rendszerek alkalmazásakor,

- visszacsatolt rendszerek alkalmazásával hierarchikus termelési rendszerek különböző szintjein, a szintek közötti kapcsolatokkal és több szintet érintő optimalizációs problémákkal.

Ez a felsorolás egyben az értekezés témaköreinek a behatárolását is adja.

2. Forgácsolási folyamatok optimálása

A jelen fejezetben forgácsolási folyamatok optimális tervezésével foglalkozunk, vagyis feltételezzük, hogy ismert a folyamat modellje és úgy akarjuk meghatározni üzemszerűen nem változó paramétereit, hogy valamely célfüggvény szélsőértékét érje el.

Az optimálási feladat különböző szinteken és különböző módokon fogalmazható meg.

Megfogalmazható egy-egy műveletelemre, műveletelemek adott halmazára, ezen belül egy-egy munkadarabra, munkadarabok halmazára, stb.

Megfogalmazható úgy, hogy a termelésirányítási szempontok, és úgy, hogy a technológiai tervezés magasabb szintjeinek /műveleti sorrend tervezés, művelettervezés/ szempontjai érvényesíthetők legyenek a technológiai adatok megválasztásakor.

Az optimálási feladat megfogalmazható a folyamat determinisztikus és sztochasztikus modelljére vonatkozóan.

A különböző szintekre és módokon megfogalmazott optimálási feladatokkal az alábbiakban foglalkozunk.

2.1. Forgácsoló megmunkálások determinisztikus matematikai modelljei

A forgácsolási folyamat jellemzésére a forgácsoláselmélet és a gyakorlat néhány egyszerű összefüggést alkalmaz. Ezeket használják összetettebb problémák megoldására is. Közös tulajdonságuk, hogy empirikus és statikus jellegűek.

Vizsgáljuk meg röviden a forgácsolóerő, a kopás, az éltartam és a forgácsolási zóna hőmérsékletének meghatározására vonatkozó általános összefüggéseket anélkül, hogy a megmunkálási módok sajátosságait részletesen elemeznénk.

A forgácsolási folyamat lefolyását, az ezt kísérő jelenségeket jellemző és az értékelésükre alkalmas összefüggések alkotják a folyamat matematikai modelljét.

A matematikai leírás céljának megfelelően különböző modellek léteznek.

Az alábbiakban a matematikai modellt művelet-
elemek forgácsoló adatainak optimálására vonatkozóan fogalmazzuk meg.

Ez az optimálás legalacsonyabb szintje, amelyet minden magasabb szintű probléma tartalmaz.

A forgácsoló megmunkálások optimalást szolgáló matematikai modelljének három összetevője van: a/ a feltételrendszer, b/ a célfüggvény és c/ az éltartam összefüggés.

2.1.1. A feltételrendszerek

A feltételrendszereket azok az összefüggések alkotják, amelyek meghatározzák, hogy az MKGS rendszerek milyen feltételek mellett működőképesek.

Jellegük szerint ezek az összefüggések a beállítási tartományokat, mint például a szerszámgépek előtolás és fordulatszám tartományait, az alkalmazható erőket, nyomatékokat, teljesítményeket, a forgácsolási zóna hőmérsékletét, a pontosságot, felületminőséget, rezgésmentes működést, forgástörési képességet stb. jellemzik.

A triviálisan megállapítható beállítási tartományokon kívül, a megmunkálási folyamat többi jellemzőjét rendszerint bonyolult összefüggések határozzák meg. Ezek közül viszonylag egyszerűek, de emellett a legfontosabbak is a forgácsoló erőket, nyomatékokat, teljesítményeket jellemző összefüggések.



A forgácsolóerő számítása

A forgácsoláselmélet kezdetei 1870-ig nyulnak vissza, mikor az orosz Time közzétette a forgácsleválasztás mechanikai folyamatának vizsgálatával kapcsolatos eredményeit. Azóta is intenzíven kutatják a forgácsképződés folyamatát különféle mechanikai modellek alapján. A modellek és eredmények közös tulajdonsága, hogy erősen vitatható elhanyagolásokat alkalmaznak és az összefüggések forgácsolási vizsgálatok révén nyerhető tényezőket tartalmaznak. Malloch, Zvorikin, Piispanen, Rosenheim, Sturney, Kronenberg, Merchant, Cook, Finnie, Shaw, Rozenberg, Zorev, Opitz, Lee, Schaffer, Loladze, Kobayasi, Thomsen, Palmer, Oxley - hogy csak a legjelentősebb kutatókat említsük - figyelemre méltó eredményei ellenére sem jutottak el a kísérleti eredményekkel széles érvényességi tartományban jól egyező fizikai-mechanikai alapú összefüggésekig. A hazai kutatók közül Rejtő Sándor, Kazinczy László és Hornung Andor munkáit kell kiemelni.

A jelen munkának nem feladata, hogy mélyebben tárgyalja a forgácsoláselmélet forgácsleválasztási folyamattal kapcsolatos elméleti és gyakorlati eredményeit.

A technológiai vagy más közismert néven a munkadarab-készülék-gép-szerszám rendszer /rövidítve MKGS-rendszer/ merevségi és szilárdsági tulajdonságai, az alkatrész minőségi jellemzői gátat vetnek az erő növelése elé. Meghatározása a technológiai adatok számításakor és optimálásakor feltétlenül szükséges.

Gyakorlati számítására az un. "kitevős" erőegyenleteket és a fajlagos forgácsolóerő összefüggéseit alkalmazzák.

Iparunkban, Taylor nyomán, szovjet közvetítéssel /az Országos Normaalapok 1952-ben történt kiadásával/ a kitevős egyenletek terjedtek el, hasonlóan a legtöbb szocialista országhoz. Erre vannak többé-kevésbé összefüggő kísérleti adathalmazok,

A kitevős erőegyenlet a főforgácsoló erőre esztergálás esetében

$$F_f = C_F a^{x_F} s^{y_F} v^{z_F} \quad /2.1/$$

ahol

C_F a megmunkálandó anyag forgácsolhatóságát és a szerzám pillanatnyi forgácsolóképességét jellemző állandó, értéke azonos F_f értékével $a = 1 \text{ mm}$, $s =$

= 1 mm/ford és $v = 1$ m/min mellett;

a a fogásmélység, mm;

s az előtolás, mm/ford;

v a forgácsolási sebesség, m/min;

x_F, y_F, z_F - a szerszámtól, a munkadarabtól és a megmunkálás körülményeitől függő állandók.

A forgácsolóerő normális /mélyítő irányu/ és előtolás irányu összetevőire hasonló összefüggéseket alkalmaznak.

Alkalmazzák még a forgácsolóerő számítására a fajlagos forgácsolóerőre alapozott képleteket is.

A /2.1/ összefüggés felírható általánosabb alakban is úgy, hogy valamennyi forgácsoló megmunkálásra érvényes legyen [2.2]:

$$F = C_F a^{x_F} s_z^{y_F} v^{z_F} p_F^{p_F} q_F^{q_F} r_F^{r_F} u_F^{u_F} w_F^{w_F} v_{sz}^{v_{sz}}, \quad /2.2/$$

ahol

s_z a fogankénti előtolás, mm/ford;

d a megmunkálás átmérője, mm;

b a megmunkálás szélessége, mm;

z a szerszám fogainak száma;

h a szerszám szélessége, mm;

v_{sz} a szerszám sebessége, mm/s.

Az általános képletből a 2.1. táblázat segítségével jutunk el a valamely konkrét megmunkálásra érvényes összefüggésig. A /2.2./ összefüggés természetesen feltételezi néhány fogalom - mint pl. a fogszám, a megmunkálási átmérő - általánosítását is.

A C_F , valamint a kitevők értékének módosításával /2.2./ szerint nemcsak a főforgácsolóerő, hanem az előtolás irányu és a mélyítő irányu erőkomponens is felírható.

2.1. táblázat

A /2.2./ összefüggésben szereplő kitevők különböző megmunkálások esetén

Megmunkálási mód	Kitevők								
	x_F	y_F	z_F	p_F	q_F	r_F	u_F	w_F	a
Esztergálás	x_F	y_F	z_F	0	0	0	0	0	a
Fúrás	0	y_F	0	p_F	0	0	0	0	1
Felfúrás, dörzsölés stb.	x_F	y_F	0	0	0	0	0	0	a
Marás	x_F	y_F	z_F	p_F	q_F	r_F	0	0	a
Fogmarás	x_F	y_F	0	p_F	0	0	0	0	m^*
Köszörülés	x_F	y_F	z_F	0	0	0	u_F	w_F	a

* a fogaskerék modulja

A forgácsolási zóna hőmérséklete

A forgácsolási zóna - a szerszám működő élének és a munkadarab felületi rétegének - hőmérséklete befolyásolja a szerszám éltartamát, sőt igen gyakran a munkadarab minőségét. Fontos lehet a hőmérsékleti viszonyok ismerete a megfelelő hűtés és kenés megválasztása számára is. Egyes esetekben - pl. edzett alkatrészek köszörülésekor - a nemkívánatos anyagszerkezeti változások, mikrorepedések megelőzése céljából az alkalmazandó technológiai adatokat a hőjelenségek tekintetében is korlátozni kell.

Sajnos, a hőmérsékleti viszonyok mennyiségi meghatározására kevés használható összefüggés és adat létezik.

További kutatások szükségesek ahhoz, hogy a technológiai adatok számításában a hőjelenségeket megbízhatóan tudjuk kezelni.

Mindenesetre az feljegyzendő tény, hogy azokban az esetekben, amikor sikerült megbízható összefüggéseket nyerni, azok gyakran a /2.2/ erőképlethez hasonló, kitevős szorzat alakú összefüggésekben voltak összefoglalhatóak.

A forgácsolási adatok megengedett tartománya

A fentiekben bemutattuk, hogy a forgácsolási folyamat néhány jellemzője a forgácsolóerők, a szer-
számkopás és éltartam, a forgácsolási zóna hőmérsék-
lete hogyan függenek a forgácsolási adatoktól. Több
jellemzővel nem foglalkoztunk, mint például a meg-
munkálási pontosság, felületminőség, forgácstörés,
rezgés mentes működés stb.

Esetünkben az összefüggések felderítése azért
szükséges, mert ismerve az egyes jellemzők megenge-
dett értékeit, ki tudjuk választani azokat a forgá-
csolási adatokat, amelyeket alkalmazva a folyamat-
jellemzők kielégítik az irányukban támasztott köve-
telményeket, például nem lépnek túl bizonyos /erő,
nyomaték, teljesítmény stb./ korlátokat.

A forgácsolási folyamat jellemzőit leíró ösz-
szefüggések összessége, valamint a jellemzők megen-
gedett értéktartományának ismerete meghatározza a
forgácsolási adatok megengedett tartományát.

Ilyen módon általában egyenlőtlenségek halma-
zát kapjuk, amelyet feltételrendszernek szokás ne-
vezni.

Kivételes esetekben az összefüggések között
egyenlőségek is előfordulhatnak, ez azonban rendsze-
rint gyökereiben változtatja meg a feladat jellegét.

Szemléltetésképpen vizsgáljunk meg néhányat a feltételrendszer összefüggései közül esztergáló megmunkálás esetén.

Először is feltételezzük, hogy a fogásmélység "a" adott mennyiség. A későbbiekben bemutatjuk, hogy ez teljesen reális feltételezés, hiszen a fogásmélység megválasztása több műveletelemet összekapcsol és így magasabb szintű probléma, mint az előtolás és a forgácsoló sebesség.

Előtoláskorlátok

A feltételrendszer egyes elemei csak az előtolás értékét korlátozzák. Más korlátok összetettek ugyan, de a folyamat jellegéből adódóan a fordulatszám hatása elhanyagolható. Vannak korlátok, amelyek a fogásmélységtől is függenek, de kétdimenziós modellünkben $/a = \text{konst.}/$ ezek előtoláskorlátként viselkednek.

Nyilvánvaló, hogy az előtolás nem lehet nagyobb a szerszámgépen beállítható legnagyobb értéknél, azaz

$$s \leq s_g \text{ max}$$

és nem lehet kisebb, mint az előtolásskála legkisebb tagja, vagyis

$$s \geq s_g \text{ min.}$$

Általában meghatározható a szerszám konstrukciójából eredő legnagyobb előtolás és így

$$s \leq s_{sz \max}.$$

Az előtolás valamely technológiailag még megengedhető minimális értéke alatt a forgácsolás szabályos folyamatként már nem tartható fenn, ezért

$$s \geq s_{\text{tech. min}}.$$

Az előtolást általában maximálja a felületi érdesség is.

Nehezen kezelhető előtoláskorlátokat jelent a rezonanciatartományok kiiktatása. A valóságban a rezonancia jelenségek részekre darabolják a keresési tartományt, azaz több alsó és felső korlátpárt kell figyelembe venni.

┌

Fordulatszámkorlátok

Az e csoportba sorolható feltételek egy része kifejezett fordulatszámkorlát, más része viszont a forgácsolási sebességre vonatkozik, s csak a dimenziók egységesítése révén válik a választható fordulatszámot alulról vagy felülről behatároló feltétellé.

Kézenfekvő korlát az alkalmazott szerszámgépen beállitható legnagyobb fordulatszám, azaz

$$n \leq n_{g \text{ max}}.$$

A beállitható legkisebb fordulatszám az

$$n \geq n_{g \text{ min}}$$

korlátot adja. Belátható, hogy a beállitható fordulatszámokat korlátozza a forgácsolási sebesség technológiailag lehetséges maximuma és minimuma is. E korlátozás kézenfekvő esete a Taylor-összefüggés vagy az éppen alkalmazott más típusú éltartamösszefüggés érvényességi tartományának felső határa, amely az

$$n \leq n_{\text{tech. max}}$$

korlátot jelenti. Az éltartamképlet érvényességi tartományának alsó határát az

$$n \geq n_{\text{tech. min}}$$

korlát mutatja. Gyakori eset, hogy a fordulatszámot korlátozni kell a befogás labilitása, vagy az alkatrész nagymérvű kiegyensúlyozatlansága miatt. Előfordul, pl. köszörüléskor, hogy a fordulatszámot alulról kell korlátozni a tulzott helyi felmelegedés megelőzése céljából.

Az előtoláshoz hasonlóan gondot okoz a rezonanci tartományok kiiktatásához szükséges fordulatszámkorlátok meghatározása is.

A forgácsolóerővel összefüggő korlátok

Az erővel kapcsolatos korlátokat a /2.2/ összefüggés átalakítása révén nyerjük. E korlátok egy része valamely erőkomponens értékére vonatkozik: az előtolómű szerkezeti adottságai miatt az előtolásirányu komponens, a szerszám véges szilárdsága és - főként dinamikai - merevsége miatt a főforgácsolóerő értékét is korlátozni kell, természetesen felülről.

A példa egyszerűsége kedvéért írjuk fel a korlá-
tot esztergálás esetére.

A vizsgált komponens értéke nem haladhat meg
valamely számszerűen meghatározott küszöbértéket,
azaz

$$F \leq F_{\text{meg}},$$

vagy behelyettesítve

$$C_F a^{x_F} s^{y_F} v^{z_F} \leq F_{\text{meg}}.$$

A forgácsolási sebességet a fordulatszám segít-
ségével kifejezve átrendezés után a korlátra az

$$s^{y_f} v^{z_f} \leq \frac{F_{\text{meg}}}{C_F a^{x_F}} \left(\frac{1000}{\pi d} \right)^{z_F} \quad /2.3/$$

kifejezést kapjuk. Természetesen mind a főforgácso-
lóerőre, mind az előtolás irányu erőre több hasonló
alku korlátot kell felírunk.

A korlátegyenes hajlásszögét az magyarázza,
hogy a z_F kitevő értéke általában kisebb nullánál.
Ez azt jelenti, hogy a sebesség növekedésével az erő
értéke csökken, tehát állandó erőkorlát esetében na-
gyobb fordulatszámok mellett nagyobb előtolás enged-
hető meg.

Sok nehézséget okoz a fogásvétel irányu erőkomponenssel kapcsolatos korlát meghatározása. Ennek a komponensnek a rugalmas deformációkból eredő megmunkálási hibák keletkezésében van nagy szerepe s korlátozni mindenekelőtt azért szükséges, hogy a megmunkálási hibák nagysága ne haladja meg az előirt törés értékét.

A problémát egyrészt az MKGS-rendszer merevségének, másrészt a deformációt okozó erőnek a meghatározása okozza. Ennek a kérdésnek is jelentős irodalma van, azonban mivel a jelen munka témáját szorosan nem érinti, tárgyalásával nem foglalkozunk.

Egyéb korlátok

Az eddigiekben csak olyan feltételeket tárgyaltunk, amelyek közösek valamennyi forgácsoló eljárásra. Természetesen előfordulnak egy-egy megmunkálásra jellemző sajátos korlátok is. Ilyen pl. az előtolás és az átmérő összefüggése furáskor, amelyet általában az

$$s = C_d^p$$

alakban szoktak megadni. Szintén a furásra jellemző korlát a forgatónyomaték legnagyobb értéke, amely még nem veszélyes a szerszám törése szempontjából.

Az esztergálási folyamat stabilitása szemszögéből fontos, hogy a b forgácsszélesség és a h forgácsvastagság viszonya bizonyos határok között legyen. Ellenkező esetben ugyanis káros lengési jelenségek léphetnek fel.

Felírhatjuk tehát, hogy

$$\frac{b}{h} \leq \lambda_{\max},$$

vagy a forgácsolási paramétereket a κ főélelhelyezkedési szöggel kifejezve

$$\frac{a}{s \sin^2 \kappa} \leq \lambda_{\max}$$

és végül a korlát az

$$s \geq \frac{a}{\lambda_{\max} \sin^2 \kappa}$$

alakot ölti.

Az előtolás felső korlátjára az

$$s \leq \frac{a}{\lambda_{\min} \sin^2 \kappa}$$

kifejezést kapjuk.

A λ értékei a munkadarab és a szerszám anyagától függenek és széles határok között változnak. A technológiai táblázatok közlik az ajánlott szélső értékeket [2.6].

A köszörülés jellegzetes korlátozó feltétele az olyan technológiai adatkombinációk kizárása, amelyek mellett a helyi hőkoncentrációk mikrorepedésekhez, beégésekhez vezetnek. Sajnos, a jelenség kiküszöbölésére megbízhatóan alkalmas összefüggéseket ajánlani nem tudunk.

A hasonló speciális korlátok tovább tartkitják a feltételrendszer összképét, de annak jellegét nem változtatják meg.

A feltételrendszer és a megengedett tartomány

Tételezzük fel, hogy esztergáláskor a fogásmélység, vagy más megmunkálásokkor az ezzel azonos szerepet játszó egyéb mennyiség ismert.

A tárgyalt korlátozó feltételek a következő alakban jellemezhetőek

$$s^{y_i} v^{z_i} \leq C_{\max.i}$$

vagy

$$- C_{\min.k} \leq s^{y_k} v^{z_k}$$

$$i=1,2,3\dots$$

$$k=1,2,3\dots$$

Ezek a feltételi egyenlőtlenségek az előtolás és a forgácsoló sebesség síkjában kijelölik azt a tartományt, amelyből az adatok megválaszthatóak. A megengedhető és megengedhetetlen adatok halmazát a korlátegyenlőségek választják el egymástól.

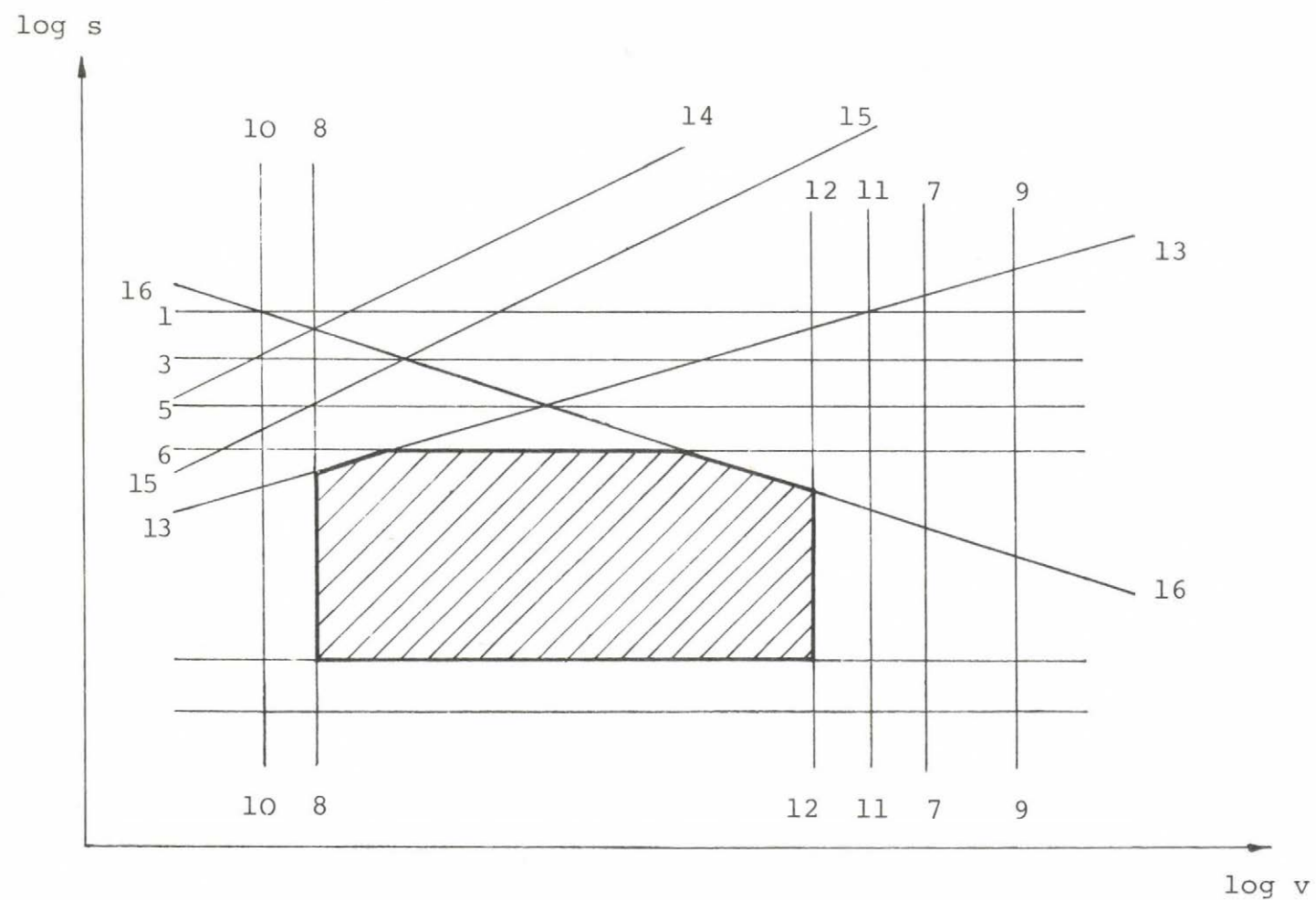
A feltételrendszer adott alakja miatt rendkívül kényelmes a korlátozó feltételeket a $\log v - \log s$ koordinátarendszerben ábrázolni, ahol azok egyenesek lesznek, amelyek általános alakja

$$y_j \log s + z_j \log v = C_j. \quad /2.4/$$

$$j = 1, 2, 3 \dots$$

Az egyenesek meredekségét az y_j és a z_j értékei határozzák meg.

Az egyenesek által kimetszett és a 2.1. ábrán bevonalkázott belső sokszög bármely pontja eleget tesz



2.1. ábra. A feltételrendszer kialakulása

/1, 2, 3, ..., 16 korlátozó egyenesek/

valamennyi korlátozó feltételnek, így ez adja a forgácsolás megengedett tartományát. A megoldásokat a tartományban vagy a tartomány határán kell keresni.

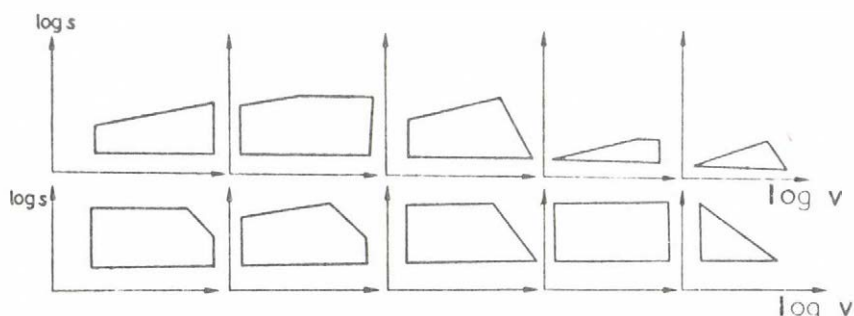
Mivel

$$v = \frac{\pi d n}{1000} \quad \text{m/min}$$

a vízszintes tengelyre akár v , akár n értékét vihetjük fel. Ez csupán léptékváltozással jár /mivel $d = \text{konst.}$ / és általában semmilyen értelemben nem érinti a tárgyaltaakat. Amikor a különbségtételnek mégis értelme van, erre külön kitérünk.

A megoldások száma így is végtelen sok, ha az előtolás vagy a fordulatszám fokozatmentesen szabályozható, és véges, ha mindkettő csak diszkrét értékeket vehet fel.

Teljesen alkalomszerű, hogy a sok korlát közül melyik lesz az a néhány, amely valóban részt vesz valamely konkrét esetben a lehetséges megoldásokat határoló tartomány kialakításában. Alkalomszerű a tartomány alakja is. A legáltalánosabbtól eltérő jellegzetes alakzatokat a 2.2. ábrán mutatjuk be.



2.2 ábra

A feltételrendszer meghatározása a forgácsolási folyamat optimálásának egyik legkritikusabb szakasza. A keresési tartomány helyes kijelölése a kulcs annak az igen gyakran hangoztatott ellentmondásnak a feloldásához, amely a forgácsolás elmélete és gyakorlata között látszólag létezik.

A technológiai adatok analitikus meghatározásával szembeni szokásos ellenérv az, hogy az elméleti értékek az adott szerszámgépen, az adott munkadarab adott szerszámmal való megmunkálásakor nem válnak be, mert a konkrét eset sajátosságait az elmélet nem veszi figyelembe.

Nos, ez az ellenérv igaz, ha a feltételrendszert figyelmen kívül hagyjuk, s elvont, idealizált környezetre tervezünk. A forgácsolás elméletének Goransz-kij [2.2] által indított legnagyobb eredménye éppen az, hogy a feltételrendszer alkalmazásával a megmunkálás konkrét körülményeit jól leíró modellt alkalmazunk, amely azt eredményezi, hogy a technológiai adatokat adaptáljuk a gyakorlati esetre.

2.1.2. Célfüggvény

A műveletelemek során alkalmazott technológiai adatok megválasztásakor ésszerű stratégia a minimális



költségre törekvés. Ekkor a

$$K = C_M(t + C_T \frac{t}{T}) \quad /2.5/$$

függvény minimalizálása a célkitűzés;

ahol

t a megmunkálási idő;

T a szerszám éltartam;

C_M a gép időegységnyi munkájára vonatkoztatott költség /például: géppercc költség, Ft/min/;

C_T arányos szerszámköltség együttható.

Vizsgáljuk az egyszerű hosszesztergálás esetét

/2.3. ábra/.

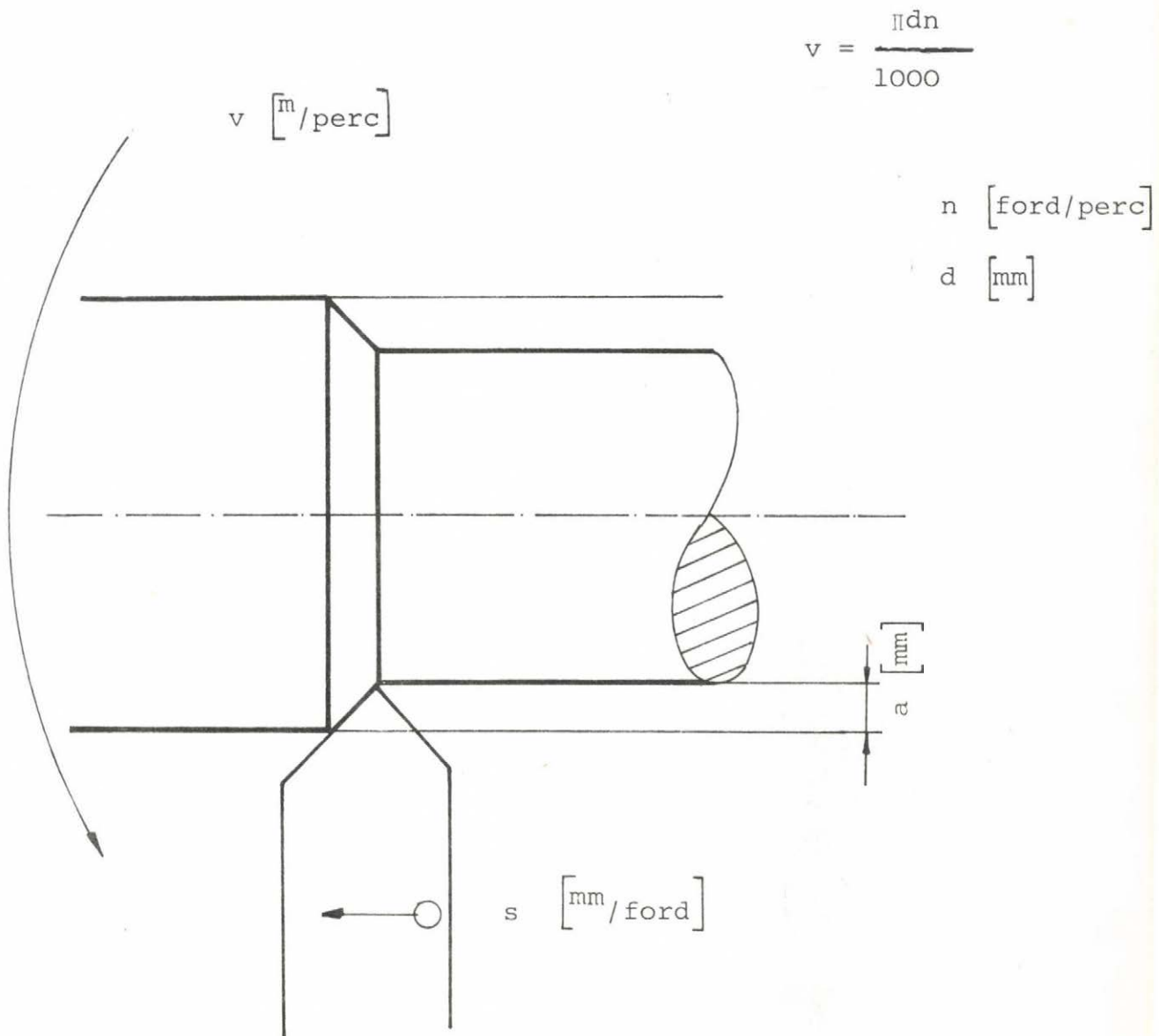
A megmunkálási idő

$$t = \frac{L}{ns} \quad \text{min} .$$

A gép munkájára vonatkoztatott költség

$$K_I = C_M t$$

A C_M percköltség helyes meghatározása a költségoptimalás egyik kulcskérdése, sajnos nehézségekbe ütközik. Sajnálatos módon iparunkban még mindig a



2.3. ábra. Hosszesztergálás

közvetlen bérre vetített rezsikulcsos költségelszámolási rendszert alkalmazzák, holott azt a fejlett ipari országok már régen elvetették. Ez a rendszer teljesen elkeni a különböző munkahelyek költségkülönbségeit és alkalmatlan a differenciált helyi költségek kimutatására.

Bálint Lajos [2.6] a

$$C_M = (1 + \frac{R}{100})b + \frac{A_g(\frac{1}{a} + \frac{R_g}{100})}{60 H_{év}}$$

viszonylag egyszerű összefüggést ajánlja, amelyben

b a gépmunkás percbére, Ft/min;

R bérkiegészítési kulcs, %;

A_g a szerszámgép értéke, Ft;

a amortizációs idő, év;

R_g a szerszámgép használatával kapcsolatos járulékos költségek /karbantartás, energia, segédanyagok, eszközlekötési járulék stb. kulcsa, %/;

H_{év} a szerszámgép éves üzemideje, h.

Az összefüggés alkalmazásához viszonylag kevés adat szükséges, hátránya viszont, hogy még mindig tartalmaz rezsikulcsokat. Az igazán jó megoldást az adja, ha ezeket teljesen kiküszöböljük és a költségösszetevőket pontosan számítjuk.

Jelenleg hazánkban is folynak munkák a költség-

összetevők pontosítására és korszerűbb költségelszámolási rendszerek kifejlesztésére [2.7]. Várhatóan a nyereségorientált szemlélet kényszere a reális költségértékelések felé tett lépéseket fogja ösztönözni.

A szerszámmal kapcsolatos költségek a következőképpen kezelhetők:

Tételezzük fel, hogy a megmunkáláskor ismert a szerszám éltartama. Jelölje ezt T / T dimenziója min/.

Ha az egy éltartamra eső szerszámköltség K_{sz} Ft, akkor ennek az L hossz megmunkálására eső része

$$K_{II} = K_{sz} \frac{t}{T} \text{ Ft.}$$

Ez azonban nem a szerszámmal kapcsolatos teljes költség, hiszen általában a szerszámcsérével kapcsolatosan is felmerülnek költségek. Amikor a szerszámcsere a gép munkaidejének felhasználásával jár, ez a költség

$$K_{III} = C_M t_{cs} \frac{t}{T} \text{ Ft,}$$

(ahol t_{cs} a szerszámcsere ideje, min/, mivel a szerszámcsere ideje egy teljes T éltartamra vonatkozik.

Összegezzük a költségeket:

$$K = K_I + K_{II} + K_{III} = C_M t_L + K_{sz} \frac{t_L}{T} + C_M t_{cs} \frac{t_L}{T} \quad \text{Ft.}$$

/2.6/

Vezessük be a

$$C_T = \frac{K_{sz}}{C_M} + t_{cs} \quad \text{min}$$

jelölést.

Érdekes megfigyelni, hogy $\frac{K_{sz}}{C_M}$ idődimenzióju mennyiség. Ez a hányados tulajdonképpen azt az időt adja meg, amelynek gépköltsége azonos az egy élezésre jutó szerszámköltséggel.

Helyettesítsük be a t értékét is:

$$K = \frac{L}{ns} C_M \left(1 + \frac{C_T}{T} \right) . \quad /2.7/$$

A /2.6/ képletben a $\frac{C_T}{T}$ dimenzió nélküli mennyiség azt fejezi ki, hogy a gép időegységnyi munkájának költségéhez e költség hányadrészét kell hozzáadni, hogy tekintetbe vegyük a szerszámmal kapcsolatos költségeket.

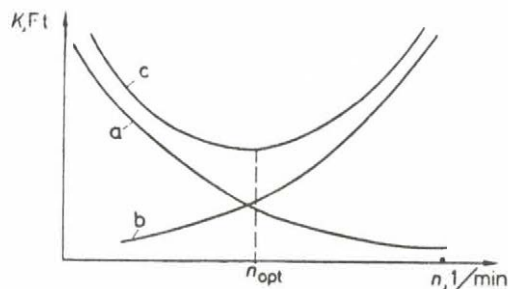
Mivel az optimáláskor a megmunkált hosszak nincsen jelentősége, célszerű a számításokat $L = 1 \text{ mm}$ hossza elvégezni.

Ekkor

$$K = \frac{C_M}{ns} \left(1 + \frac{C_T}{T} \right) \quad \text{Ft.} \quad /2.8/$$

Vizsgáljuk meg külön-külön a /2.6/ összefüggés két összetevőjét állandó előtolás mellett.

A K_I költségösszetevőt reprezentáló első tag a fordulatszám növekedésével csökken a 2.4. ábra "a" jelű görbéjének megfelelően. A forgácsolási paraméterek ismeretében meghatározható a T éltartam, s így a /2.6/ összefüggés második összetevőjének értéke is. Az ábrán ennek változását a "b" jelű görbe mutatja.



2.4. ábra. A költségek változása a fordulatszám függvényében

A két görbe összegzésével kapjuk a megmunkálási költségek "c" görbéjét, s meghatározhatjuk az ennek minimumát eredményező n_{opt} fordulatszámot.

Minimális költség

Mint láttuk, a /2.6/ célfüggvény átírható a /2.7/ alakba.

T

Mivel a forgácsolósebesség és a fordulatszám arányos mennyiségek, a /2.8/ képlet átírható a

$$K = \frac{C'_M}{vs} \left(1 + \frac{C_T}{T}\right) \quad /2.9/$$

formába is, ahol

$$C'_M = \frac{\pi d}{1000} C_M$$

Ha az éltartam meghatározható mint az előtolás és a forgácsoló sebesség függvénye $T = T(s, v)$, akkor a megmunkálási költség szintén meghatározható

$$K = K(s, v)$$

alakban.

Az optimálás célja olyan s és v értékek meghatározása, amelyek mellett

$$K = \min K(s, v) .$$

Minimális idő /maximális termelékenység/

A későbbiekben bemutatjuk, hogy műveletelemek adatainak a megválasztásakor, mikor a megmunkáló rendszer többi szintjének szempontjait nem vesszük tekintetbe, a minimális megmunkálási költségre tö-

rekvés a legtermészetesebb stratégia. Amikor a termelésprogramozási szempontok előtérbe kerülnek, a megmunkálási idők válhatnak elsőrendűen fontossá.

A megmunkálási időt hasonló összefüggés jellemzi, mint a megmunkálási költséget:

$$t_e = t + C_T \frac{t}{T} \quad /2.10/$$

ahol

t_e műveletelen idő;

t a gépi fő idő;

$C_T = t_{cs}$ a szerszámcsere ideje, min.

A /2.10/ összefüggésben csak azok az idők szerepelnek, amelyek a technológiai adatokkal közvetlen kapcsolatban vannak. A műveletelen időre vetített egyéb összetevők /mellékidők/, /a költségfüggvényhez hasonlóan/ nincsenek tekintetbe véve, hiszen ezen a szinten az optimalásra semmiféle hatással sem bírnak.

A /2.10/ összefüggés átalakítható /2.8/ /vagy /2.9/-hez hasonló alakba:

$$t_e = \frac{1}{ns} \left(1 + \frac{C_T}{T} \right) \quad /2.11/$$



$$t_e = \frac{C_t}{v_s} \left(1 + \frac{C_T}{T}\right) \quad /2.12/$$

$$(C_t = \frac{\pi d}{1000})$$

A legkisebb főidő

Előfordul - többszerszámos műveletek esetében -, hogy a szerszámcsere nem jár idővesztéssel. Ennek egyik feltétele, hogy a szerszám éltartama nagyobb legyen, mint az adott szerszámmal a legközelebbi szerszámcsere előtt végrehajtandó műveletelemek együttes főideje, a másik pedig az, hogy a szerszámcsere végrehajtható legyen a szerszámgép leállítása nélkül azon idő alatt, amíg más szerszám működik. Az első feltétel furatok megmunkálásakor, kisebb marási műveleteknél, sőt gyakran esztergáláskor is teljesül, míg a másodikat szerszámtáras szerszámcserélős szerszámgépek, integrált gyártórendszerek elégítik ki.

Ilyenkor a /2.11/ összefüggésben a zárójeles kifejezés második tagja kiesik és a célfüggvény a

$$t_e = \frac{1}{ns} \quad /2.13/$$

alakú.

t_e minimumát akkor éri el, amikor az ns szorzat minimális értékű.

7

Az optimálási módszerek ismertetésekor bemutatjuk, hogy a /2.13/célfüggvény alkalmazásakor az optimálási feladat lényegesen leegyszerűsödik.

Mivel célunk az optimálási alapgondolat következetes végigvitele, néhány további problémára /például: a legnagyobb nyereségre optimálás/ más helyen térünk vissza.

2.1.3. Éltartam összefüggés

Forgácsolási adatok optimálásának célfüggvényében szerepel a szerszám éltartama.

Az optimáláshoz szükséges, hogy felderítsük a forgácsolási adatok és a szerszámkopás, szerszáméltartam közötti kapcsolatot.

A szerszám kopása

A különböző megmunkálási módokat más-más kopásmód /kráteres, hát-, csucs-, mellékélkopás stb./ jellemzi, más a domináns kopások jellege /abrazív, diffúziós stb./, más a dimenziója is. Ugyanakkor a különböző kopásmódok - nem azonos intenzitással - egyidejűleg figyelhetők meg majd minden esetben. A szerszám éltartamát az a kopásmód határozza meg, amelyre a kopás mértéke leghamarabb éri el a megengedett legnagyobb értéket.

A forgácsolási paraméterek és a t idő nem túl nagy változási tartományát feltételezve minden kopásmódra és megmunkálási módra elfogadhatjuk a

$$\Delta = C_{\Delta} a_{\Delta}^{x_{\Delta}} s_{\Delta}^{y_{\Delta}} v_{\Delta}^{z_{\Delta}} t_{\Delta}^{u_{\Delta}} \quad /2.14/$$

összefüggést, amelyben

Δ a kopás pillanatnyi mértéke mm vagy mm^2 , a kopás értelmezésétől függően;

t a forgácsolásban eltöltött idő, min;

C_{Δ} , x_{Δ} , y_{Δ} , z_{Δ} , u_{Δ} a megmunkálási körülményekre jellemző állandók.

A kopás időbeni lefolyásának ismerete az éltartam meghatározásához, a szerszámkopások előrejelzéséhez fontos, különösen változó mértékű megengedett kopások és pontos megmunkálások esetén.

A szerszám éltartama

A Taylor-összefüggés

A forgácsolási paraméterek, a megengedett kopásérték és a szerszám éltartama közötti valóságos összefüggés igen bonyolult. Az utóbbi időben több biztató eredményt értek el ebben a témakörben, mégis az ipari gyakorlatban csupán az egyszerű Taylor-

egyenlet használható, mivel viszonylag megbízható és aránylag bő adathalmaz csak ehhez áll rendelkezésünkre.

A közismert Taylor-féle éltartam-összefüggés esztergálásra a /2.14/ egyenlet átalakításával nyerhető:

$$T^m = \frac{C'_v \Delta f_v}{y_{va} x_v} \quad /2.15/$$

vagy, ha az éltartamot valamely rögzített kopásértékre írjuk fel

$$T^m = \frac{C_v}{y_{va} x_v}, \quad /2.16/$$

ahol

T a szerszám éltartama, min;

m az un. Taylor-kitevő;

C_v az összefüggés konstansa, amely függ a munkadarab anyagától és a szerszám minőségétől, valamint a megmunkálás egyéb körülményeitől is;

f_v, x_v, y_v a megmunkálási körülményektől függő kitevők.

Szélesebb tartományokban elvégzett vizsgálatok azt mutatják, hogy az m, x_v és y_v értéke nem állandó. Különösen jelentős az m kitevő változása. Állan-

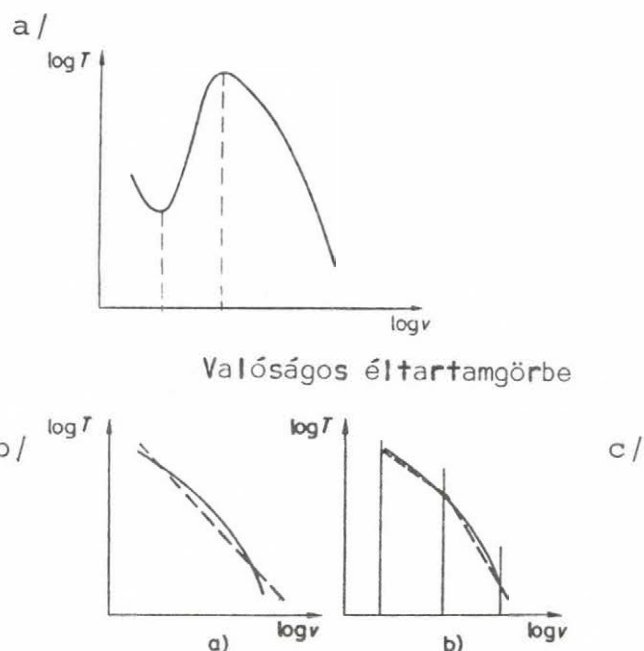
dó előtolás és fogásmélység, forgácsolhatóság és forgácsolóképesség mellett az éltartam és a forgácsolási sebesség logaritmusának összefüggése nem lineáris, hanem a 2.5a ábrán mutatott görbéhez hasonló.

Nyilvánvaló, hogy az a-b tartományban forgácsolni ésszerűtlen, hiszen a sebesség növelésével az éltartam nő, tehát a sebességet legalább a $\log v = b$ értékig érdemes növelni. A $\log v < a$ tartomány rendszerint nem esik a gyakorlatban alkalmazott sebességek közé. Bonyolult, összetett szerszámok esetében /pl. csoportmarók/ mégis előfordulhat, hogy egyes élek kedvezőtlen tartományokban forgácsolnak.

A Taylor-összefüggés a valóságos éltartam görbét egyenessel közelíti /2.5b ábra/. Az ebből származó pontatlanságok kiküszöbölhetők pl. úgy, hogy az s, v és "a" változási tartományát szakaszokra bontjuk és minden szakaszhoz egy-egy állandó készletet rendelünk. Ez a szakaszos Taylor-közelítés látható a 2.5c ábrán.

A Taylor-összefüggés minden megmunkálási eljárásra felírható, ha az eljárás éltartamkritériumát és paramétereit megfelelően értelmezzük és az érvényességi tartományt helyesen jelöljük ki. A köszörülés esetében pl. a

$$T = \frac{C}{z^u}$$



2.5. ábra. Az éltartamgörbe lineáris /Taylor szerinti/ /a/; és szakaszosan lineáris közelítése /b/

összefüggést alkalmazzák, ahol

$$z' = sv,$$

azaz az egységnyi korongszélességre eső percenkénti anyagleválasztás, mm^3/min , tehát ez is Taylor-egyenlet /u a megfelelő Taylor-kitevő/.

A /2.16/ Taylor-összefüggés állandói az anyagtól, szerszámtól, körülményektől függően széles határok között változnak. Általában igaz, hogy a megmunkálási tartományban az éltartam a sebesség növelésével jelentős mértékben csökken. Kisebb a hatása az előtolás, vagy a fogásmélység növekedésének. Erre a

kérdésre az optimálási módszerek elemzésekor még visszatérünk.

Érzékeltetésképpen bemutatunk néhány példát az állandók alakulására vonatkozóan.

Abból a célból, hogy a technológiai adatok hatása világosabb legyen, a Taylor-összefüggést az alábbi alakba írjuk át:

$$T = \frac{\frac{1}{m} C_v}{z_T y_T x_T} \quad /2.17/$$

ahol

$$z_T = \frac{1}{m},$$

$$y_T = \frac{y_v}{m},$$

$$x_T = \frac{x_v}{m}.$$

Néhány esetre a C_v együtthatót, az m , a z_T , y_T és x_T kitevőket a 2.2. táblázat mutatja. A 2.2. táblázat alapjául a szovjet technológiai kézikönyv [2.7] szolgált.

Ez - viszonylag általános esetekre nyújt adatokat. Az adatok aktualizálásához a C_v együttható helyett a C_{va} aktuális együtthatót szokták alkalmazni, ahol

$$C_{va} = C_v \prod_{i=1}^n K_{vi};$$

K_{vi} / $i = 1, 2, \dots, n$ / a megmunkált anyag mechanikai tulajdonságait, az előgyártmány minőségét, a megmunkálandó felület állapotát, a megmunkálási fajtát, a szerszám forgácsoló élének anyagát, geometriáját, a szerszám csucssugarát, keresztmetszetét, a megmunkálási hosszt, a megmunkáló berendezés állapotát, a hűtést stb. tükröző állandók.

A 2.2. táblázathoz hasonló általános információnál, konkrét esetekben, pontosabb képet nyújtanak a szűkebb kiinduló feltételekre megadott adatok. A Budapesti Műszaki Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanácskén, hazai integrált gyártórendszerek forgácsolási adatszükségleteinek ellátására 1977-79-ben kidolgozták az IGRA elnevezésű adatbázis rendszert.

Az IGRA szigorúan megadott körülményekre, pontosan definiált konkrét szerszámokra tartalmaz adatokat. Néhány IGRA adatot a 2.3. táblázatban közlünk. Azokat a körülményeket /például: pontos szerszámgeometriát/, amelyekre a táblázat adatai vonatkoznak, nem közöljük. Természetesen az IGRA adatokból korrekciós együtthatókkal a megadott körülményektől eltérő esetekre is lehet adatokat generálni.

Jelen munka nem tűzhet ki célul az adatok elemzését. A táblázatok közlése csak azt a célt szolgálta, hogy képet lehessen alkotni az adatok struk-



Megmunkálási mód	Szerszám anyag	Előtolás tartomány	C_v	m	x_T	y_T	z_T	y_v
Szerkezeti acél $\sigma_B = 750 \text{ N/mm}^2$								
Külső hossz- esztergálás	Keményfém "a"	s 0,30-ig 0,30-től 0,70 s 0,70-től	420 350 340	0,20	0,75	1,0 1,75 2,25	5,0	0,20 0,35 0,45
	Gyorsacél* "b"	s 0,25-ig s 0,25-től	87,5 56	0,125	2,0	2,64 5,28	8,0	0,33 0,66
Leszúrás	Keményfém "a"	-	47	0,20	-	4,0	5,0	0,80
	Gyorsacél* "b"	-	23,7	0,25	-	2,64	4,0	0,66
Fazon esztergálás	Gyorsacél* "b"	-	22,7	0,30	-	1,67	3,33	0,50
Öntött vas HB 190								
Külső hossz- esztergálás	Keményfém "c"	s 0,40-ig s 0,40-től	292 243	0,20	0,75	1,0 2,0	5,0	0,20 0,40
Leszúrás	Keményfém "c"	-	68,5	0,20	-	2,0	5,0	0,40
	Gyorsacél "b"	-	22,5	-	-	2,7	6,66	0,40
Kovácsolt vas HB 150								
Külső hossz- esztergálás	Keményfém "d"	s 0,40-ig s 0,40-től	317 215	0,20	0,75	1,0 2,25	5,0	0,20 0,45
	Gyorsacél "b"	s 0,25-ig s 0,25-től	106 75	0,125	1,6	2,0 4,0	8,0	0,25 0,50
Leszúrás	Keményfém "c"	-	86	0,20	-	2,0	5,0	0,40
	Gyorsacél* "b"	-	47	0,25	-	2,0	4,0	0,50
Heterogén rézöntvények HB 100-140								
Hosszesztergálás	Gyorsacél "b"	s 0,20-ig s 0,20-től	270 182	0,23	0,52	1,09 2,18	4,35	0,25 0,50
Szilumin és $\sigma_B = 100 \pm 200 \text{ N/mm}^2$, HB ≤ 65 aluminium öntvények; duraluminium $\sigma_B = 300 \pm 400 \text{ N/mm}^2$, HB ≤ 100								
Hosszesztergálás	Gyorsacél "b"	s 0,20-ig s 0,20-től	485 328	0,28	0,43	0,89 1,79	3,57	0,25 0,50

2.2. táblázat.

A Taylor-éltartamösszefüggés állandói esztergáláskor.

/Tájékoztató értékek [2.7] alapján./

* Hűtéssel.

Az alkalmazott szovjet szerszámanyagok és magyar megfelelőik:

"a" T15K6 \rightarrow DA10; "b" P18 \rightarrow R3

"c" BK6 \rightarrow DR20 ; "d" BK8 \rightarrow DR30

Mégmunkálási mód	Munkadarab anyag	Szerszám	Érvényességi tartomány			C_v	m	x_T	y_T	z_T	y_v
			s	v	a						
Külső hossz- esztergálás	Öv 20	K20	$0,2 \div 1$	$80 \div 160$	$2,0 \div 10$	204,17	0,21	0,8	2,0	4,8	0,42
	Öv 20	K10	$0,2 \div 1$ $0,1 \div 0,32$	$63 \div 160$ $160 \div 250$	$1,6 \div 10$ $1 \div 3,2$	443,47 267,90	0,29 0,2	0,43 1	0,82 2	3,5 5	0,24 0,40
	Öv 20	M15	$0,4 \div 1$	$50 \div 125$	$4 \div 10$	446,83	0,56	0,5	0,8	1,8	0,45
	MEEHANITE	K20	$0,2 \div 160$	$63 \div 160$	$2 \div 6,3$	208,30	0,27	0,84	1,48	3,77	0,40
Furat- esztergálás	Öv 20	K20	$0,2 \div 0,8$ $0,2 \div 0,8$	$50 \div 80$ $80 \div 160$	$2 \div 8$ $2 \div 8$	255,45 186,51	0,29 0,21	0,8 0,8	2 2	3,5 4,8	0,58 0,42
	Öv 20	K10	$0,2 \div 0,8$ $0,05 \div 0,32$	$63 \div 160$ $160 \div 250$	$1,6 \div 8$ $0,5 \div 3,2$	391,26 245,95	0,29 0,2	0,43 1	0,82 2	3,5 5	0,24 0,40
	Öv 20	M15	$0,4 \div 0,8$	$50 \div 125$	$3 \div 8$	350,49	0,56	0,5	0,8	1,8	0,45

2.3. táblázat.

Néhány IGRA adat.

turáiról /például: érvényességi tartományaik jelle-
géről/ az összefüggések paramétereinek nagyságrend-
jéről és arányaikról.

Különböző megmunkálási módokra a Taylor-féle él-
tartamösszefüggés formája különböző, bár felépítése
/2.16/-hoz hasonló marad.

Az összefüggés általános formája [2.2.]:

$$T^m = \frac{C_v K_v d^{z_v}}{a_f^{x_v} s^{y_v} z^{u_v} B^{r_v}} \quad /2.18/$$

ahol

$$K_v = \prod_{i=1}^n K_{vi}$$

a_f = $a_{\text{feltételes}}$ - a fogásmélység, vagy ennek meg-
felelő más változó /fogszám, modul stb./;

d a munkadarab vagy szerszám átmérője /mm/;

z a szerszám fogszáma;

B a marás vagy köszörülés szélessége /mm/;

z_v, u_v, r_v kitevők.

A /2.18/ általános összefüggésből, megmunkálá-
si esetektől függően, a_f és az x_v, y_v, z_v, u_v, r_v
megfelelő behelyettesítésével /a kitevők esetenként
0 értékűek/ alakulnak ki a konkrét összefüggések. Er-
re összefoglaló táblázatot például a [2.2] munka közöl.

A gyakorlatban alkalmazott megmunkálásokra majdnem kivétel nélkül jellemző, hogy az éltartam a forgácsoló sebesség mellett az előtolástól is függ $/y_v \neq 0/$. Mivel ez a két változó, amellyel a következőkben sokat foglalkozunk, megvizsgáltuk a [2.7] kézikönyv és az IGRA adatait abból a szempontból, hogy hogyan alakulnak az y_v és az m értékek, valamint viszonyuk.

Mint a táblázatokból látható, $y_v < 1$ feltétel minden esetben teljesül, sőt az esetek többségében $y_v < 0,5$.

Ugyanez igaz más megmunkálási módokra is. /A fent említett források adatai között ugyan kuriózum gyanánt előfordult csekély értékkel 1 feletti y_v érték is, de olyan csekély arányban, hogy ez említésre is alig méltó./

Ez a tény azt mutatja, hogy mint már említettük, a gyakorlatban előforduló forgácsolási adattartományokban a forgácsolási sebesség hatása az éltartam alakulására lényegesen nagyobb, mint az előtolásé. /Az éltartam képletekben a sebesség és az előtolás hatványkitevőinek aránya $1/y_v$./

Az adatok vizsgálata azt is mutatja, hogy általában $y_v > m$, bár az esetek bizonyos, nem elha-

nyagolható arányu részében ez nem így van. Ez a tény, mint a későbbiekben kiderül, az optimálás szempontjából lényeges jelentőséggel nem bír.

Figyelemreméltó még, hogy a z_T kitevő általában nagy érték. Az 5 és e feletti értékek gyakorisága, de még a kisebb értékek is mutatják, hogy a forgácsoló sebesség növelése drasztikus következményekkel járhat az éltartam vonatkozásában. Az y_T kitevő általában mérsékeltebb nagysága indokolja azt a szokásos adatmegválasztási stratégiát, amely az előtolásnak az adott korlátok között lehetséges mértékű növelésére törekszik.

Ezeket az utóbbi kérdéseket a következőkben igen részletesen tárgyalni fogjuk.

Más éltartam összefüggések

Tyemcsin, Klusin és Kronenberg is javasolt olyan összefüggést, amely a $\log T$ - $\log v$ görbét nem logaritmikus egyenesként ábrázolja, hanem több-kevesebb pontossággal leírja a b ponttól jobbra eső szakaszt /2.5 ábra/. A teljes görbe közelítése eddig csak szakaszosan sikerült [2.3] .

A nem linearizált éltartam-összefüggések legismertebb példája a König-Depiereux-éltartamegyenlet, amely szintén csak a b felső csúcsponttól jobbfelé

eső leszálló ágat írja le. Ez az éltartamegyenlet a következő:

$$T = e^{-\frac{k_v}{m}v^m - \frac{i_s}{n}s^n + C},$$

természetesen rögzített fogásmélység mellett.

Az összefüggésben

e a természetes logaritmus alapja;

k_v , m , i_s , n , C anyagtól, szerszámtól, megmunkálási körülményektől függő állandók.

Például P15 jelű keményfémre Cm55N jelű acél forgácsolási-
sakor; $a = 3$ mm fogásmélység, $\kappa = 70^\circ$ főélelhelyez-
kedési szög és $r = 1,2$ mm csucssugár mellett az
összefüggés a

$$T = e^{-\frac{2,34}{2,5}10^{-5} \cdot v^{2,5} - \frac{5,91}{1,43}s^{14,3} + 7,16}$$

konkrét értéket kapja.

Mivel az összefüggést javaslók az aacheni INFOS technológiai információs rendszerrel szoros kapcsolatban állnak, feltehető, hogy a rendszer módszeresen gyűjti az új éltartamegyenlet gyakorlati alkalmazásához szükséges adatokat. A jövő szempontjából tehát ez az összefüggés érdekes lehet.

Az egzakt éltartamegyenletek előállítása a ko-

pás mechanizmusának bonyolult jellege és a domináns kopásmódoknak a forgácsolási paraméterektől függő változása miatt nagyon nehéz és nyilvánvalóan az összefüggések is bonyolultak lesznek. Ezért - és a forgácsolási folyamatnak saját lényegéből eredő sztochasztikus jellege miatt - a jövőben nagy figyelmet kell szentelni a statisztikus éltartam-összefüggések feltárására. Ezek módot nyújtanak az optimálási problémák ujszerű megfogalmazására és megoldására. A korszerű mérési és számítógépes kiértékelési módszerek meg fogják teremteni már a közeljövőben az ilyen összefüggések feltárásának lehetőségeit.

Addig is, a jelenleg rendelkezésre álló ismeretanyag /pl. a Taylor-összefüggés adathalmaza/ alkalmas - megfelelő kritikával - a jelenleginél sokkal hatásosabb optimálási módszerek kidolgozására.

2.2. Elsődleges optimálás determinisztikus modellek alapján

A 2.1. pontban ismertettük a forgácsolási folyamatok leírásának módszereit. Felhasználásukkal kaptuk meg a folyamat matematikai modelljét. A matematikai modell ahhoz szükséges, hogy matematikai módszerekkel

7

vizsgálhassuk meg, milyennek legcélszerűbb választani a folyamat lefolyását meghatározó mennyiségeket.

Munkadarabok forgácsoló megmunkálásának tervezése összetett feladat. Az ennek során megoldandó problémák közül ebben a munkában csak néhányat tárgyalunk. Ezek mind a legkedvezőbb technológiai adatok meghatározásával kapcsolatosak, nevezetesen az egy fogásban el nem távolítható ráhagyások fogásokra való felosztása, valamint az egyes műveletelemekben alkalmazott előtolások és forgácsolási sebességek meghatározására.

Egy-egy munkadarab megmunkálásában a különböző műveletelemek általában különböző sullyal szerepelnek. A klasszikus optimálási eljárások ezt a körülményt nem veszik figyelembe. Az optimális technológiai adatok csak egy-egy művelet elem szempontjait tükrözik és figyelmen kívül hagyják azt, hogy a munkadarabot a műveletelemek összessége hozza létre. Ez a módszer sok esetben megfelelő, de ha a munkadarab egészének megmunkálásával kapcsolatosan is vannak kiegészítő követelmények, módosításra szorulhatnak. Ilyen követelményeket előidézhetnek termelésirányítási megfontolások, mivel szükségessé válhat egyes munkadaraboknak az elsődlegesen tervezettnél

└

gyorsabb legyártása, a szerszáméltartamok, szerszámcserek összehangolása és ütemessége stb. Ezek a követelmények az egyes műveletelemek összegeként adódó munkadarab megmunkálási időre vonatkozó korlátozásként és az egyes szerszámok összegzett kopására vonatkozó korlátozásként jelentkeznek és lényegesen módosítják az optimálási feladatot.

A jelen pontban a műveletelemek adatainak olyan módon való optimálásával foglalkozunk, amikor ezeket elkülönítjük a termelési folyamat minden egyéb szintjétől és izoláltan vizsgáljuk. Ezt elsődleges optimálásnak nevezzük.

2.2.1. Optimálási módszerek

A technológiai adatok meghatározására szolgáló módszerek fejlesztése hosszú multra tekinthet vissza, hiszen lényegében egyidős a tudományos igényű munkaszervezési módszerek kialakulásával, a kopási folyamat vizsgálatával. Nagyon érdekes és tanulságos fejlődésük rövid áttekintése, mivel kiválóan érzékelteti az utóbbi években bekövetkezett szemléletbeli változásokat.

A technológiai adatok meghatározására alkalmazott módszerek függenek a megmunkálás jellegétől.



A probléma súlyát is különbözőképpen kezelték attól függően, hogy milyen volt a gyártás tömegszerűsége. Tömeggyártás esetén a technológiai adatok optimális meghatározását fontosnak tartották, olyannyira, hogy rendszerint forgácsolási kísérletekkel határozták meg a kopási viszonyokat is. Egyedi és sorozatgyártás esetében - mivel a technológiai adatok beállítása végső soron a szakmunkásokon mulott - a kérdésnek nem tulajdonítottak jelentőséget.

Ez a különbség az egyedi, a sorozat- és a tömeggyártás között az NC-gépek megjelenésével elmosódik, egyrészt azért, mert a technológiai adatok beállítása NC-gépeken automatikusan megy végbe, tehát az optimális technológia betartása műszakilag az egyedi és a sorozatgyártásban is garantálható, másrészt azért is, mert e nagy értékű gépek intenzív kihasználásának gazdasági jelentősége igen nagy.

Az optimális technológiai adatok meghatározása egyedi és kissorozat-gyártás esetében sokszorta nehezebb, mint tömeggyártási feltételek mellett. Az alacsony tömegszerűség miatt ugyanis nem lehetséges kísérleteket végezni minden feladatra, de az idő sem elegendő, hogy ilyen módszerekkel határozzák meg az optimális adatokat. Ez a két körülmény ösztönözte jól szervezett technológiai adatbázisok, technoló-

giai adatbankok kiépítését és számítógépes módszerek fejlesztését a technológiai adatok meghatározására.

2.2.1.1. A "gazdaságos" éltartamról

Taylor a kopási folyamat vizsgálatát és a technológiai adatok meghatározására szolgáló módszerek fejlesztését nem gazdasági optimalás céljából szorgalmazta. Munkaszervezési okokból azt akarta elérni, hogy a különböző szerszámok egyszerre és előre meghatározott időpontban kopjanak el és így a szerszámcserek rendszeres időközönként legyenek végrehajthatók. Kényelmes volt a szerszámcsereket óránként, kétóránként, vagy műszakonként végrehajtani, attól függően, hogy milyen anyagot, milyen szerszámmal, milyen szerszámgépen munkálnak meg. Kopásvizsgálatok alapján táblázatokat állítottak fel, amelyekben a fogásmélység és előtolás diszkrét értékeihez olyan forgácsolási sebességeket rendeltek, amelyek betartása esetében az éltartam 60, 120 vagy 480 min-ra adódott.

Még ma is előfordul, hogy ezeket az éltartamértékeket "gazdaságosnak" nevezik. A feltételrendszer és a célfüggvények ismeretében könnyen belátható,

hogy ezek az éltartamértékek sem nem optimálisak, sem nem gazdaságosak.

Nem is ezt a célt szolgálták Taylor megfogalmazásában, és csupán véletlen, ha a "gazdaságos" éltartamhoz tartozó forgácsolási paraméterek valamilyen optimumfeltételt kielégítenek.

Sajnos, ennek ellenére előfordul az ilyenfajta éltartamértékek fetisizálása. Az elterjedt számítási logika a következő: meghatároznak valamely s , majd ahhoz valamely a értéket. Ezek ismeretében számítják a "gazdaságos" éltartamot adó forgácsolási sebességet. Ha a sebesség beállítása valamilyen akadályba - pl. teljesítménykorlátba - ütközik, csökkentik az előtolást vagy a fogásmélységet, vagy mindkettőt. Ezekhez újra számítják a "gazdaságos" éltartamnak megfelelő forgácsolási sebességet. A próbálkozást addig folytatják, amíg a sebesség beállíthatóvá nem válik.

Ez a számítási logika kifejezetten téves és káros. Általában minél következetesebben ragaszkodunk e számítási módszerhez, annál inkább távolodunk az optimális technológiai adatoktól. Helyesebb lenne pl. a teljesítménykorlát túllépése esetén a sebesség csökkentése, a "gazdaságos" éltartam feláldozása és a valóságos éltartam növelése, mivel ez a megmunkálási időket és a költségeket is csökkenti.

Az állítás könnyen belátható, hiszen közismert, és az előzőekben be is mutattuk, hogy a sebesség csökkentésével a kopás rohamosan csökken, míg a forgásmélység és az előtolás növelésével a kopás csak lassan növekszik. Így esetenként kiválaszthatók a "gazdaságos" éltartamhoz tartozóknál nagyobb s és a értékek, amelyek mellett nemcsak az éltartam lesz nagyobb, hanem az egységnyi idő alatt leválasztott forgácsmennyiség is.

Más esetekben viszont bizonyos határokig célszerű lenne a sebesség növelése, hogy csökkenjenek vagy megszűnjenek a kihasználatlan teljesítménytartalékok.

Sem az egyik, sem a másik esetben nem segít a "gazdaságos" éltartam erőszakolása, a módszer a gazdasági célokkal ellentétes hatást kiváltó lépésekre ösztönöz. Sajnálatos módon az eredeti cél - ti. a kopási folyamatok szinkronizálása és a szerszám-cserék rendszeressé tétele - sem teljesül e módszer egyszerű alkalmazásával, hiszen a különböző szerszámok egy-egy alkatrész megmunkálása során különböző ideig forgácsolnak, s így hiába tartjuk be az éltartamok azonosságát, valós "naptári" időben az egyes szerszámok kopása még abban az esetben sem egyszerre éri el a kritikus értéket, ha a kopási

folyamatok a várakozásnak megfelelően, ideálisan zajlanak le. A szerszámcserek ütemessé tétele csak a különböző szerszámok kopási folyamatainak utólagos összehangolása révén válik lehetségessé.

2.2.1.2. Az optimálás klasszikus módszere

A következő fejlődési szakaszt annak felismerése jellemezte, hogy a forgácsolási paraméterek megválasztásával tudatosan lehet szolgálni valamely gazdasági cél megvalósítását.

Az éltartamot nem tekintik most már függetlennek a forgácsolás körülményeitől, ezért nem is törekszenek előre meghatározott általános értékek beállítására. A kidolgozott módszer logikája a következő: minden esetre kiszámítanak valamely optimális éltartamértéket, majd az előre kiválasztott előtolás és fogásmélységhez olyan forgácsolási sebességet számítanak a Taylor-összefüggés segítségével, amely mellett az éltartam optimálisra adódik. Az éltartam optimumának kritériuma a költség vagy a megmunkálási idő minimuma.

Az optimumot egyszerű szélsőértékszámítással kapják, azaz minden korlátozás nélkül megkeresik a célfüggvény minimumát. Bizonyítható, hogy állandó



előtolás mellett ez a minimum valamely optimális éltartamnál lép fel, amelynek értéke független az előtolás, a fogásmélység és a forgácsolási sebesség nagyságától, ha az m Taylor-kitevő állandó.

Valóban, vizsgáljuk a /2.8/ célfüggvényt:

$$K = \frac{C_M}{sn} \left(1 + \frac{C_T}{T} \right) \quad /2.19/$$

ahol

$$C_T = \frac{K_{sz}}{C_M} + t_{cs}.$$

Legyen az állandó előtolás értéke $s = s_1 = \text{konst.}$

A fogásmélység $a = a_1 = \text{konst.}$, értéke szintén ismert. Ekkor

$$K = \frac{C_1}{n} \left(1 + \frac{C_T}{T} \right) \quad /2.20/$$

ahol

$$C_1 = \frac{C_M}{s_1}$$

A fordulatszám a Taylor-összefüggésből kifejezhető az éltartammal. Mivel

$$T^m = \frac{C_v}{v s^{y_v} a^{x_v}} = \frac{1000 C_v}{\pi d n s_1^{y_v} a_1^{x_v}}$$

Alkalmazzuk a

$$C_2 = \frac{1000C_v}{\pi ds_1 a_1 \frac{y_v x_v}{a_1}}$$

jelölést. Így

$$n = \frac{C_2}{T^m} \quad /2.21/$$

Behelyettesítve a /2.21/ összefüggést a /2.20/ képletbe, kapjuk

$$K = \frac{C_1}{C_2} T^m \left(1 + \frac{C_T}{T}\right) = \frac{C_1}{C_2} (T^m + C_T T^{m-1}). \quad /2.22/$$

A K költségfüggvénynek ott van a minimuma, ahol

$$\frac{\partial K}{\partial T} = 0.$$

A /2.22/ képlet alapján

$$\frac{\partial K}{\partial T} = \frac{C_1}{C_2} \left[m T^{m-1} + C_T (m-1) T^{m-2} \right] = 0,$$

vagyis

$$\frac{C_1}{C_2} T^{m-2} \left[m T + C_T (m-1) \right] = 0.$$

Innen a költségfüggvény minimumához

$$T_{K \text{ opt}} = \left(\frac{1}{m} - 1\right) C_T \quad /2.23/$$

éltartam tartozik.

Az optimális éltartam ilyen értelmezésben költségadatoktól függ /a Taylor-kitevő mellett/.

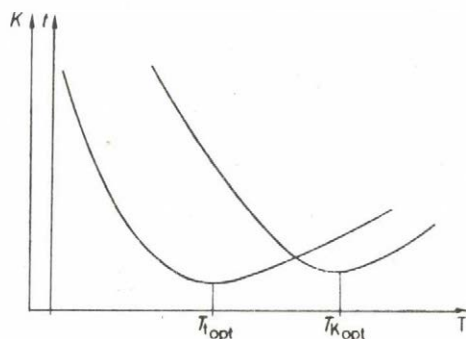
A minimális megmunkálási idő elérése iránti törekvés esetében a K_{sz} szerszámköltséget nem vesszük figyelembe $/K_{sz} = 0/$, így az időminimumhoz tartozó optimális éltartamra a

$$T_{t \text{ opt}} = \left(\frac{1}{m} - 1\right) t_{cs} \quad /2.24/$$

összefüggést kapjuk. Ezt az optimumot viszont csak időadatok határozzák meg.

A $/2.23/$, $/2.24/$ kifejezés összevetéséből látható, hogy az időminimumhoz tartozó éltartam kisebb, mint a költségminimumot adó éltartam $/2.6. \text{ ábra}/$, s így a $T_{t \text{ opt}}$ -nak megfelelő sebesség nyilvánvalóan nagyobbra adódik.

Az optimálás bevezetése óriási előrelépést jelent, de az ilyen klasszikus értelmezésnek számos hiányossága van. Mindenekelőtt feltűnő a problémának egydimenziós optimálási feladatként való keze-



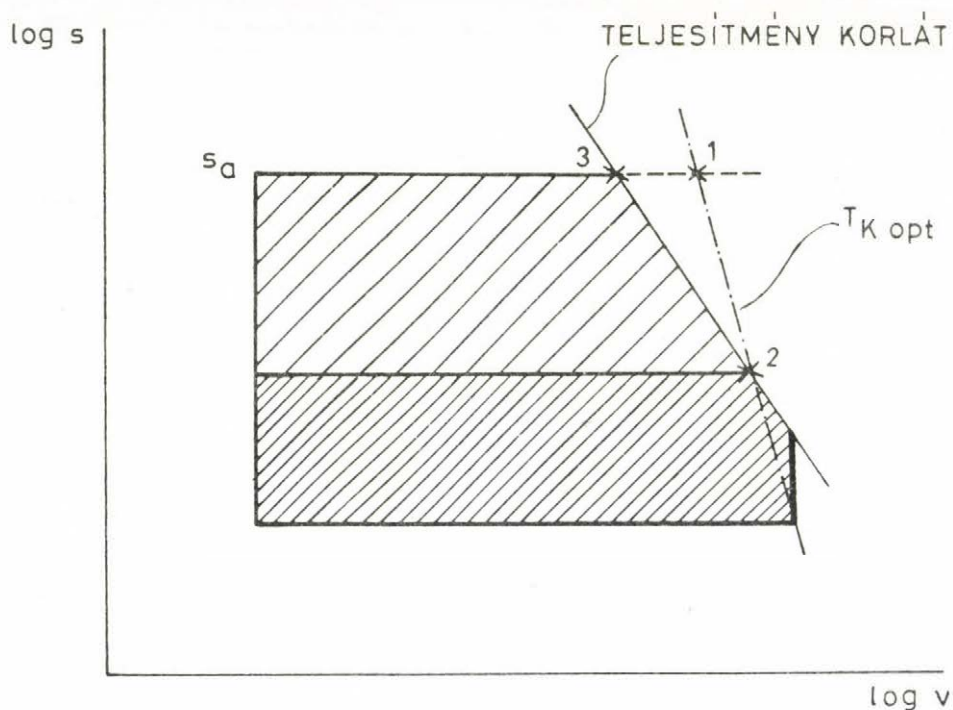
2.6. ábra. Az időminimumhoz és költségminimumhoz tartozó éltartamok

lése, holott a feladat jellegzetesen háromdimenziós. Változónak kell feltételeznünk a forgácsolási sebesség mellett az előtolást és a fogásmélységet is. A fogásmélység és előtolás meghatározásában ez a módszer nem nyújt segítséget.

A módszer alapvető hiányossága, hogy az optimumot korlátozások nélkül keresi, így az optimális értékek csak elvi jelentősége van. Leggyakrabban ugyanis az optimális éltartamhoz tartozó forgácsolási sebesség értéke kívül esik a feltételrendszer szabta keresési tartományon.

Vizsgáljunk egy konkrét példát. A 2.7a ábrán látható esetben az 1 pont eredményezné a költségfüggvény minimumát adott s_a előtolásérték mellett. Azonban az 1 pontbeli adatok beállításakor a teljesítménykorlátba ütközünk s újból felmerül a "gazdaságos" éltartam kapcsán tárgyalt probléma, hogy

ti. erőszakoljuk-e a vélt optimum beállítását az előtolás és a fogásmélység csökkentésével, vagy pedig a sebességet csökkentjük-e a teljesítmény megszabta szintre. Sajnos a gyakorlatban legtöbbször az első megoldást választják. Mai fogalmaink szerint ezzel tulajdonképpen ösztönösen új feltételrendszert határoznak meg, azaz az eredeti keresési tartományt az előtolás és a fogásmélység csökkentésével addig deformálják - nyújtják a tengely mentén -, míg a T_{opt} által meghatározott fordulatszámot /forgácsolási sebességet/ magába nem foglalja. A munkapont 1-ből a 2-be tolódik.



2.7.a ábra.

A keresési tartomány változása.

A szovjet Goranszkij érdeme, hogy elsőként szakított az optimálás hagyományos módszereivel, el-

vetette a zárt kifejezésekkel egyszerű szélsőérték-számítással meghatározható optimális éltartam alkalmazását, s megalapozta a korszerű számítógépes optimalizációs módszereket [2.2]. Már 1953-ban kidolgozta és az összes forgácsoló megmunkálásra kiterjesztette, majd a gyakorlatban is bevezette a számítógépes optimalizációs és normaszámítási eljárásokat.

Módszerének lényege az alábbiakban foglalható össze: Minden megmunkálási esetben meghatározza a forgácsolási adatok megállapításának konkrét feltételrendszerét. A fogásmélységet adottnak /előre meghatározottnak/ veszi, azaz csak az n és s értéket tekintti ismeretlennek. Feltételezi, hogy előre ismert az optimális éltartam, amelyet alsó korlátnak tekint, tehát bevezeti a

$$T \geq T_{\text{opt}} = \left(\frac{1}{m} - 1 \right) C_T$$

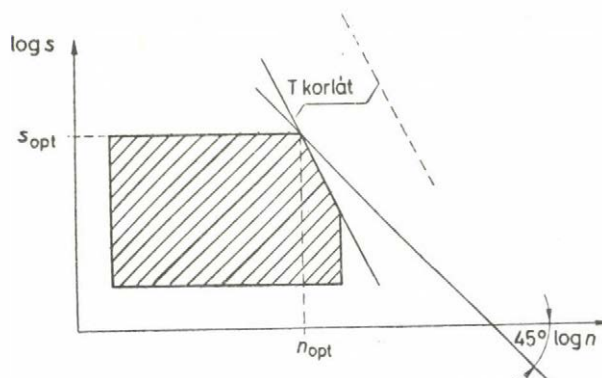
korlátozást. A Taylor-összefüggésbe behelyettesítve kapja az alkalmazott feltételrendszer dimenzióinak megfelelő

$$v_s^{Y_v} \geq \frac{C_v}{T_{\text{opt}}^m a^{x_v}}$$

korlátot, amely átalakítások után ferde egyenesként ábrázolható a $\log n - \log s$ koordinátarendszerben /2.7b ábra/. Az optimális éltartamot tehát Goranszkij újabb korlátozó tényezőként beépíti a feltételrendszerbe. Teljesen alkalomszerű, hogy a korlát valóban a része lesz-e a keresési tartományt meghatározó sokszögnek, vagy sem /szaggatott vonal/.

Az optimális forgácsolási paraméterek meghatározására a lineáris programozás módszerét alkalmazta.

Nyilvánvaló, hogy az adott esetben, mint ezt a 2.7b ábra szemlélteti, a megoldást a megengedett tartományt jobbról érintő -45° -os egyenes érintkezési pontja szolgáltatja.



2.7b ábra. A Goranszkij-módszer

Ez a módszer tulajdonképpen azt jelenti, hogy Goranszkij az igen egyszerű

$$ns \rightarrow \max$$

célfüggvényt fogalmazza meg optimum feltételként, természetesen az éltartamkorlátot is magában foglaló feltételrendszer határain belül.

A Goranszkij módszerével számított eredmények a gyakorlati esetek többségében helyesek, annak ellenére, hogy a módszer matematikai tévedésen alapul. A valóságban a feladat nem oldható meg lineáris programozási módszerrel, mert míg a feltételrendszer logaritmikus transzformációval linearizálható, ez nem igaz a célfüggvényre. E hiba Goranszkij érdemeit, jelentőségét nem csorbitja, hiszen ő adott indítást az ilyen irányú kutatásnak, a kutatók ma is Goranszkij nyomán indulnak el.

A Goranszkij-módszer hibáját a következő egyszerű példán mutatjuk be.

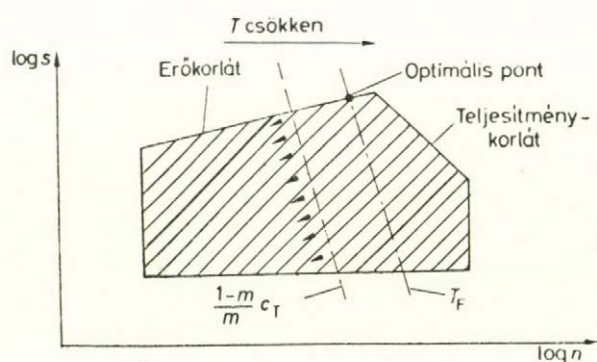
Tételezzük fel, hogy a forgácsolás megengedett tartományának felső határát a forgácsolóerő /vagy valamely komponensének/ korlátértéke szabja meg /2.8. ábra/. Jellemezze, a korábbiaknak megfelelően, a forgácsolóerőt az

$$F = C_F a^{x_F} s^{y_F} v^{z_F}$$

összefüggés.

Ha $a = a_1 = \text{konst.}$, az erőkorlátot az

┐



2.8. ábra. Optimális pont az erőkorláton

$$F = C_a s^{Y_F} v^{z_F} \leq F_{\text{meg}} \quad /2.25/$$

egyenlőtlenség jellemzi, ahol

$$C_a = C_F a_1^{x_F}.$$

Ha $z_F = 0$, akkor a megengedett tartomány felső határa párhuzamos a $\log v$ tengellyel. Azonban ismert, hogy a sebesség növekedésével a forgácsolóerő gyakran csökken. Ezt a forgácsolóerő összefüggésben a $z_F < 0$ érték fejezi ki, ami azt jelenti, hogy a megengedett tartományt határoló erőkorlát egyenes nem párhuzamos a $\log v$ tengellyel. /Lásd pl. [2.7] adatait./

Ekkor a költségfüggvény minimumához tartozó éltartamnak a /2.23/ összefüggés szerinti meghatározásához felhasznált feltételezés, nevezetesen, hogy $s = \text{konst.}$, nem érvényes.

Tételezzük fel, hogy az optimális pont az erőkorláton van. Bizonyítható /lásd 2.1. függelék/, hogy ekkor az optimális ponthoz tartozó éltartam

$$T_F \text{ opt} = \left(\frac{Y_F - Y_Z Z_F}{Y_F - Z_F} \frac{1}{m} - 1 \right) C_T. \quad /2.26/$$

Ha $z_F = 0$, akkor a /2.23/ és /2.26/ kifejezés szerinti éltartam azonos. Ha $z_F < 0$, akkor /mivel $y_V < 1$ / a /2.26/ szerint meghatározott érték kisebb, mint a rögzített előtolás mellett /2.26/ szerint kapott éltartam.

Az optimális éltartam csökkenése azt jelenti, hogy magasabb intenzitással forgácsolhatunk. A Goransz-kij-módszer ezt a lehetőséget nem veszi tekintetbe és a forgácsolás tartományát úgy szűkíti le, hogy kizárja az optimális pontot /lásd a 2.8. ábra szaggatott vonalát/. Mivel igen sok gyakorlati esetben z_F értéke zérus, vagy ahhoz közeli, az erőkorláton való forgácsoláskor ez az elvi hiba eltéréseket nem okoz.

Durvább hibákra vezethet, ha az optimális üzemmód a megengedett tartomány más korlátjain van. Téte-

lezzük fel például, hogy valamilyen okból rögzítik a forgácsolási sebességet. Bizonyítható /lásd az 1. függelékét és [2.8]/, hogy ekkor az optimális pont-hoz tartozó éltartam

$$T_{v \text{ opt}} = \left(\frac{y_v}{m} - 1 \right) C_T. \quad /2.27/$$

Mivel sokszor y_v értéke 1-nél jóval kisebb /tételezzük fel, hogy $y_v > m/$, $T_{v \text{ opt}}$ értéke igen kis értékű is lehet.

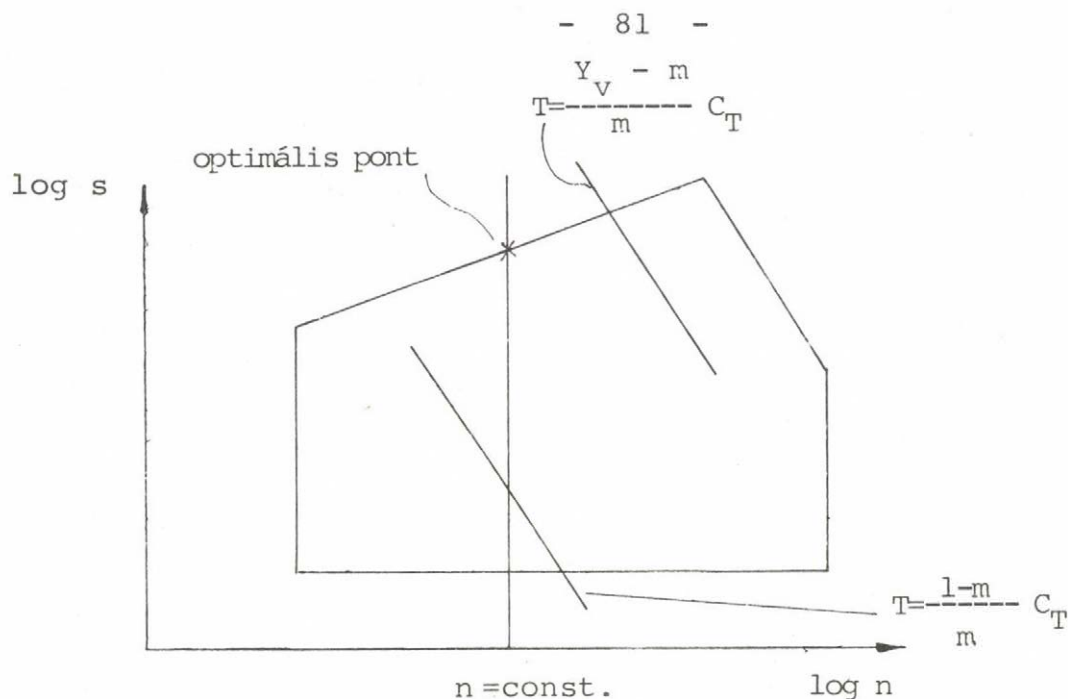
Általában

$$\left(\frac{y_v}{m} - 1 \right) C_T \ll \left(\frac{1}{m} - 1 \right) C_T,$$

így lényeges különbség lehet az optimális és a Goranszkij módszerével számított adatok között. Ezt az eltérést a 2.9.ábra szemlélteti.

Goranszkij módszerét azóta számos kutató /közöttük maga Goranszkij is/ továbbfejlesztette. E munkák közös vonása, hogy elvetették a lineáris programozás alkalmazását s egyáltalán nem tételezik fel semmiféle előre ismert gazdaságos vagy optimális éltartam létezését.

Ennek megfelelően az éltartamot teljesen kiiktatják a feltételrendszerből, az optimum feltételét

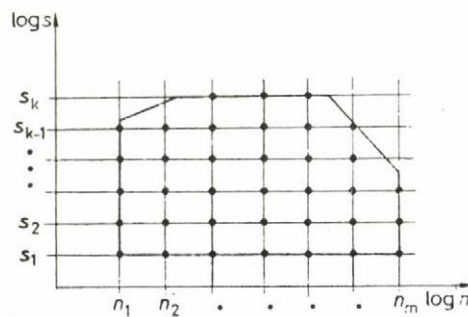


2.9. ábra. Az optimális pont rögzített fordulatszám mellett

a célfüggvényben fogalmazzák meg, amelybe viszont a szerszámkopás okozta időkiesést vagy költségeket beépítik.

Ebben teljeseedett ki a Taylorral indult fejlődési folyamat s egyuttal ezzel vált teljessé a taylori alapgondolathoz viszonyított szemléletbeli változás is. Teljesen visszájára fordult a forgácsolási adatok számításának logikája. Korábban a fogásmélység és előtolás megválasztása után először az éltartam optimális értékét határozták meg és ahhoz kerestek megfelelő fordulatszámértéket. Ma viszont az optimális éltartam nem cél, hanem eredmény, következmény. Előbb meghatározzák azokat a forgácsolási paramétereket, amelyek a feltételrendszer határai között legjobban kielégítik a célfüggvényben megfogalmazott stratégiát, majd az ezekhez tartozó éltartamot, s ezt tekintik optimálisnak.

Az ilyen felfogásban kidolgozott számos rendszer közül kiemelkedő a Gépipari Technológiai Intézet és a Nehézipari Műszaki Egyetem Gépgyártástechnológiai Tanszéke által közösen kidolgozott TAUPROG és TURNMOD [2.9, 2.10] rendszer. A 2.1. pontban ismertetett feltételrendszert és célfüggvényeket alkalmazzák és az optimalásra igen egyszerű módszert választottak ki. Feltételezik, hogy az előtolás és a fordulatszám nem túl sok diszkrét értéket vehet fel. Ezek az értékek egy háló csomópontjaiként a feltételrendszerrel együtt meghatározzák azokat a pontokat, amelyek a forgácsolás megengedett tartományában vannak és a gépen is beállítható n , s értékeknek felelnek meg /2.9/a ábra/.



2.9/a. ábra. Közvetlen keresés diszkrét pontokban

Ezekben a pontokban rendre kiszámítják a megmunkálás költségeit a /2.42/ célfüggvény szerint és az eredmények közül kiválasztják azt, amely mellett a költség minimális lesz. Ez az optimális technológia.

A megmunkálási idő minimumának keresésekor hasonlóan járnak el.

A feladat megoldásakor a fogásmélységet ismertnek tételezik fel, tehát az optimálást kétdimenziós problémaként kezelik. A fogásmélység meghatározására a feladatot úgy terjesztik ki, hogy - egyenletes fogásokat feltételezve - a ráhagyást $1, 2, \dots, k$ fogással választják le, s mindegyik fogásszámhoz meghatározzák a megfelelő fogásmélységet. Minden - immár ismert - fogásmélységre elvégzik a kétdimenziós optimálási feladatot és az összes megoldások közül azt választják ki, amely a legkedvezőbb célfüggvény értéket adja.

Ennek a módszernek az a hiányossága, hogy csak diszkrét n és s sorral bíró szerszámgépekre alkalmazható. A hagyományos gépek többsége is ilyen, de az NC-szerszámgépekre egyre inkább a fokozatmentes hajtás /különösen az előtolásnál/ a jellemző. A probléma áthidalható megfelelően megválasztott diszkrét lépcsők alkalmazásával. Hátránya a módszernek az igen nagy számításigény, az egyenlő nagyságu fogások feltételezése, valamint az a körülmény, hogy nem ad minőségi képet a rendszer viselkedéséről.

A Gépipari Technológiai Intézetben kidolgozott FORTAP rendszerben alkalmazott eljárás abból az egy-

szerűsített feltételezésből indul ki, hogy az optimális munkapont mindig a feltételrendszer felső vízszintes határoló egyenesén van. Ha az optimális éltartamhoz tartozó fordulatszám kívül esik a keresési tartományon, a munkapontot a teljesítménykorlát által meghatározott jobb felső sarokpontban határozza meg.

Az ismertetett tervező rendszerek továbbfejlesztett változatai a jelen értekezés szerzője által javasolt és a következőkben tárgyalt optimálási módszer alkalmazták /lásd például [2.11]/.

2.2.2. A technológiai adatok optimálásának általános módszere

A jelen disszertáció szerzője, felhasználva saját és Girnt Márton eredményeit [2.8], olyan módszert javasolt, amely rendkívüli módon leegyszerűsíti az optimális adatok meghatározását, de ezen felül világosságot teremt az optimális forgácsolás stratégiai kérdéseiben is.

2.2.2.1. Optimumkeresés rögzített fogásmélység mellett

A korábbiakban ismertettük a forgácsolási folyamat egy lehetséges matematikai modelljét. Ebben a modellben három olyan mennyiség szerepelt, amelyeket - adott korlátozások betartásával - szabadon lehet megválasztani. Matematikailag megalapozott ez a választás, ha a választott értékek mellett a célfüggvény optimális értékű. Először azzal az esettel foglalkozunk, amikor az előtolás és a főorsó fordulatszám a feltételrendszer szabta korlátok között bármilyen értéket felvehet.

Nem feltételezhető ugyanez a fogásmélységre. Nyilvánvaló, hogy adott ráhagyás eltávolításakor az egyes fogásmélységek összegének a ráhagyás értékét kell adnia, vagyis

$$a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_k = R, \quad /2.28/$$

ahol:

R az adott ráhagyás;

$a_1, a_2 \dots$ az egyes fogásmélységek értékei;

k a fogások száma.

A /2.28/ korlátozás különbözik a 2.1.pontban ismertetett matematikai modellek korlátozásaitól,



mivel nemcsak egy műveletelemre vonatkozik, hanem többet kapcsol össze. Nem egyenlőtlenség, hanem egyenlőség, nem szorzat, hanem összeg típusu. Ez általában azt jelenti, hogy a fogásmélységre is kiterjedő háromdimenziós optimálási feladat nem kezelhető úgy, mint az előtolás és a forgácsolási sebességet tartalmazó kétdimenziós feladat. Természetesen a fogásmélység optimális vagy kvázioptimális megválasztásának is jelentős szerepe van, azonban ennek alapjául csak a kétdimenziós feladatok megoldása szolgál.

Ezért először azt az esetet elemezzük, amikor a fogásmélység adott. Ekkor a megmunkálási folyamat feltételrendszere a következő általános alakban írható fel:

$$G_j \min \leq s^y_j v^{z_j} \leq G_j \max, \quad /2.29/$$

$$j = 1, 2, 3, \dots,$$

ahol $G_j \min$ és $G_j \max$ alsó és felső korlátértékek. Amikor csak az egyik érvényes, a másik elmarad. A csak az előtolásra vagy a forgácsolási sebességre vonatkozó korlátozások esetében y_j vagy z_j értéke zérus.

Ilyen korlátozások mellett a Taylor-féle éltartam összefüggés érvényességét feltételezve az elő-

tolás és a forgácsolási sebesség optimálására két tétel használható fel.

1. tétel. Az optimumpont helye

Az optimumpont csak a keresési tartomány határán lehet, sőt ott sem akárhon, hanem csak azokon a szakaszon, amelyeket a $\log v$, $\log s$ síkban ábrázolt tartomány bármely pontjából felfelé induló -45° hajlásszögű egyenes metsz /2.10. ábra/.

Bármelyik -45° -os egyenesen a vs szorzat értéke állandó, azaz az egyenesen felfelé haladva a megmunkálás főideje változatlan marad. Ugyanakkor viszont egyre nő a T éltartam értéke.

A T_1, T_2, \dots, T_n éltartam egyenesek meredekebbek, mint a -45° -os egyenes.

Hajlásszögük ugyanis

$$L = \operatorname{arctg}\left(-\frac{1}{Y_v}\right),$$

s közismert, hogy az éltartam összefüggés y_v kitevőjének értéke általában $0,1 \div 0,3$, de egynél feltétlenül kisebb. Nyilvánvaló, hogy $T_1 > T_2 > \dots > T_n$, s így a 2.10. ábra kiemelt egyenesének a pontjában az éltartam kisebb, mint a b pontban. A főidő állandósága

┐

pont csak az 1-2-3-4-5 szakaszon lehet. Ezt a következőkben optimumesélyes határvonalnak nevezzük.

Hogyan találhatjuk meg az optimális pontot? Ebben a következő, már nem ennyire egyszerűen belátható tétel segít.

2. tétel. Az optimum szempontjából esélyes görbén legfeljebb egy lokális szélsőérték pont lehet

A 2. tételt is az előző példán szemléltethetjük. Az 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 szakaszokat bennfoglaló egyeneseken a potenciális optimumpontok helye egyszerű szélsőértékszámítással meghatározható. Ha a szélsőérték a megengedett tartományt behatároló valamelyik szakaszon van, akkor ez lesz az optimális pont. Ha a szélsőérték pont kívül esik a tartomány határain, akkor a célfüggvény értéke a tartományt határoló szakasz valamelyik szélső pontjában lesz minimális. Ezek szerint az optimum az 1, 2, 3, 4, 5 pontokon kívül csak 1-2, 2-3, 3-4, 4-5 szakasz valamely egyetlen pontjában lehet. A lehetséges eseteket a 2.11. ábra szemlélteti. Vagy az 1 jelű esettel találkozunk, amikor valamelyik szakaszon valóban létezik szélsőérték, vagy a 2 jelű görbével jelzett eset valósul meg, amikor két szakasz közös pontja az optimális.

A 3 jelű változat a 2 jelű görbe speciális esete, amikor az optimumpont a tartomány szélére esik. A 4 jelű görbe szerinti eset, amikor a költségfüggvénynek egynél több lokális szélsőérték pontja van az optimumesélyes határvonalon, az adott matematikai modell esetében lehetetlen.

Az optimumesélyes határvonal egyes szakaszain a szélsőértéket eredményező pont meghatározását részletesen tárgyalja a 2.1. függelék. A 2. tétel bizonyítását a 2.2. függelék nyújtja.

Megemlítjük, hogy a fenti tételeken alapuló optimálási módszer a hazai köztudatban az optimumesélyes pontok módszere elnevezéssel vált ismeretessé.

2.2.2.1.1. Az optimálás algoritmusa

A 2.1. függelékben bebizonyítjuk, hogy amikor az optimumesélyes határvonal valamelyik szakaszán létezik lokális szélsőérték pont, akkor az ehhez tartozó $T_{\text{szélsőérték } j} = T_{\text{szj}}$ éltartam nem függ sem a fogásmélységtől, sem az előtolástól, sem a forgácsló sebességtől, és értékét a következő kifejezés határozza meg:

$$T_{\text{szj}} = \frac{1 + y_v N_j - (N_j + 1)m}{m(N_j + 1)} C_T \quad /2.30/$$

ahol N_j az

$$s = G_j v^{N_j} \quad /2.31/$$

megengedett tartományt határoló görbe logaritmikus transzformáció utáni meredeksége /a T_{szj} j-indexe azt jelenti, hogy minden szakaszhoz a saját optimális éltartam értéke tartozik/.

A /2.30/ képletből látható, hogy a szélsőérték ponthoz tartozó éltartam értéke az adott szakasz meredekségén kívül csakis a Taylor-egyenlet kitevőitől és a C_T együttható értékétől függ.

Mivel

$$N_j = \frac{z_j}{y_j},$$

a /2.30/ kifejezés a /2.29/ alakban felírt korlátozások esetén a

$$T_{szj} = \frac{y_j - y_v z_j - (y_j - z_j)^m}{m(y_j - z_j)} C_T \quad /2.32/$$

alakban is felírható.

Az optimálás algoritmusának alapján a következő:

Az 1. pontból kiindulva sorban meghatározzuk az

optimumesélyes határvonal valamennyi szakaszának határpontjait az óramutatóval ellenkező irányban haladva. /Azért ezt az irányt választjuk, mert nagyobb a valószínűsége, hogy az első néhány szakaszon van az optimális pont./

Minden egyes szakaszra csakis a következő esetek lehetségesek:

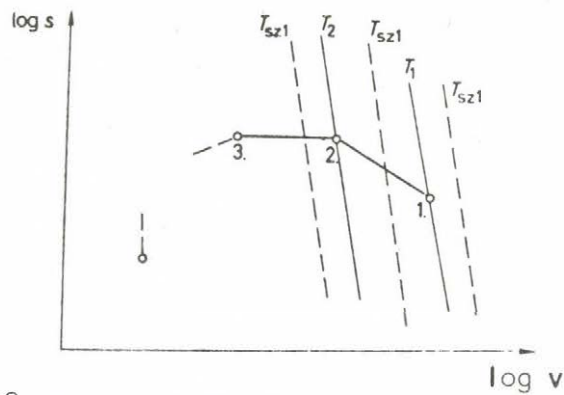
- A célfüggvény értéke a szakasz pontjai közül valamelyik végpontban a legkisebb, vagy
- a szakasz valamelyik pontjában a célfüggvény lokális szélsőértékét éri el. Ez utóbbi esetben - az 1. és 2. tételek szerint - ez a pont egyben globális szélsőérték pont is.

Az optimális pontot a következő eljárással határozhatjuk meg:

- a/ az 1. pontban a Taylor-képlet szerint kiszámítjuk a hozzá tartozó T_1 éltartamot. Meghatározzuk a /2.30/ képlet szerint az /1-2/ szakaszhoz /lásd a 2.12. ábrát/ tartozó optimális T_{sz1} éltartamot.
- b/ Összehasonlítjuk a T_1 és T_{sz1} éltartamot.
- c/ Ha

$$T_1 \geq T_{sz1},$$

akkor az 1. pont optimális. Ez nyilvánvaló, hiszen ekkor a célfüggvény értéke az /1-2/ szakaszon az 1.



2.12. ábra. Az optimálási algoritmus szemléltetése

pontban a legkisebb, a 2. pont felé haladva monoton jelleggel növekszik.

A 2. tétel értelmében az optimumra esélyes határvonalon a 2., 3. stb. pontok felé haladva a célfüggvény értékének csökkenése már nem várható, ezért a további vizsgálódás felesleges. Az optimális technológiai adatok az 1. ponthoz tartozó v_1 és s_1 értékek lesznek.

d/ Ha

$$T_1 < T_{sz1},$$

akkor kiszámítandó a 2. ponthoz tartozó T_2 is.

e/ Ha

$$T_2 > T_{sz1},$$

akkor az /1-2/ szakaszon lokális szélsőérték pont van /lásd a 2.12. ábrát/.

Az optimális ponthoz tartozó s_{opt} előtolás és v_{opt} forgácsolási sebesség értékek a

$$T^m = T_{szl}^m = \frac{C_v}{y_v x_v}$$

és az

$$s = G_1 v^{N_1}$$

összefüggésekből számíthatók ki, azaz

$$v_{\text{opt}} = \left(\frac{C_v}{G_1 y_v x_v T_{szl}^m} \right)^{\frac{1}{y_v N_1 + 1}}$$

$$s_{\text{opt}} = G_1 v_{\text{opt}}^{N_1}$$

/Megjegyzés: az e/ pontban vázoltak ugy is alkalmazhatók, hogy nem határozzuk meg a 2. pontban a T_2 éltartam értékét, hanem közvetlenül kiszámítjuk az s_{opt} , v_{opt} értékeket és ha az adott szakaszon vannak, akkor ezek az optimális technológiai adatok./

f/ Ha

$$T_2 < T_{szl},$$

7

akkor az optimális pont nem az első szakaszon van és a 2 ponttól kezdődően a /2-3/ szakaszon megismétlendők az /1-2/ szakaszra elvégzett vizsgálatok. Ennek első lépése a T_2 és T_{sz2} éltartamok összehasonlítása. Ha

$$T_2 \geq T_{sz2},$$

akkor a 2 pont optimális stb.

g/ Ez az eljárás addig folytatható, ameddig meg nem találjuk az optimális pontot.

Előfordulhat az is, hogy az eljárás során olyan szakaszig jutunk el, amelyhez tartozó optimális éltartam negatív. Ebben az esetben az előző szakasz második határpontja az optimális pont.

Semmiféle jelentősége sincs az optimálás szempontjából, hogy az összefüggésekben a forgácsoló sebesség v , vagy a fordulatszám szerepel, hiszen mivel feltételezzük, hogy $d = \text{konst.}$, a két mennyiség a

$$v = \frac{\pi d n}{1000}$$

összefüggéssel egymásba átszámítható.

A fent ismertetett módszert Girnt Márton loká-



lis szélsőértékekre vonatkozó eredményeit felhasználva, jelen értekezés szerzője dolgozta ki. A lokális szélsőértékekre hasonló eredmények a [2.12] műben is megtalálhatók. Az MTA SZTAKI-ban, a vázolt elvek alapján, optimálási programok készültek CDC-3300 számítógépre és különböző típusu kisszámítógépekre. Az eljárás még kisgépen is rendkívül gyorsnak bizonyult. A módszer annyira egyszerű, hogy asztali vagy zsebszámológépen is könnyen alkalmazható.

A javasolt optimálási módszert alkalmazzák a GTI-ben újabban fejlesztett számítógépes tervezési rendszerek. A BME Gépgyártástechnológiai Tanszéken EMG 666 asztali számológépre fejlesztettek ki optimáló programot. Ugyanez a tanszék a Magyar Hajó és Darugyár számára dolgozott ki kisszámítógépes technológiai tervező rendszert, amely szintén a vázolt módszert alkalmazza.

A módszer nagygépes alkalmazásakor, mint a későbbiekben bemutatjuk, magasabb szintű optimálási problémák megoldásának alapjául szolgálhat.

A következőkben bemutatjuk az optimálási módszer különböző szintű alkalmazásait és továbbfejlesztési lehetőségeit.

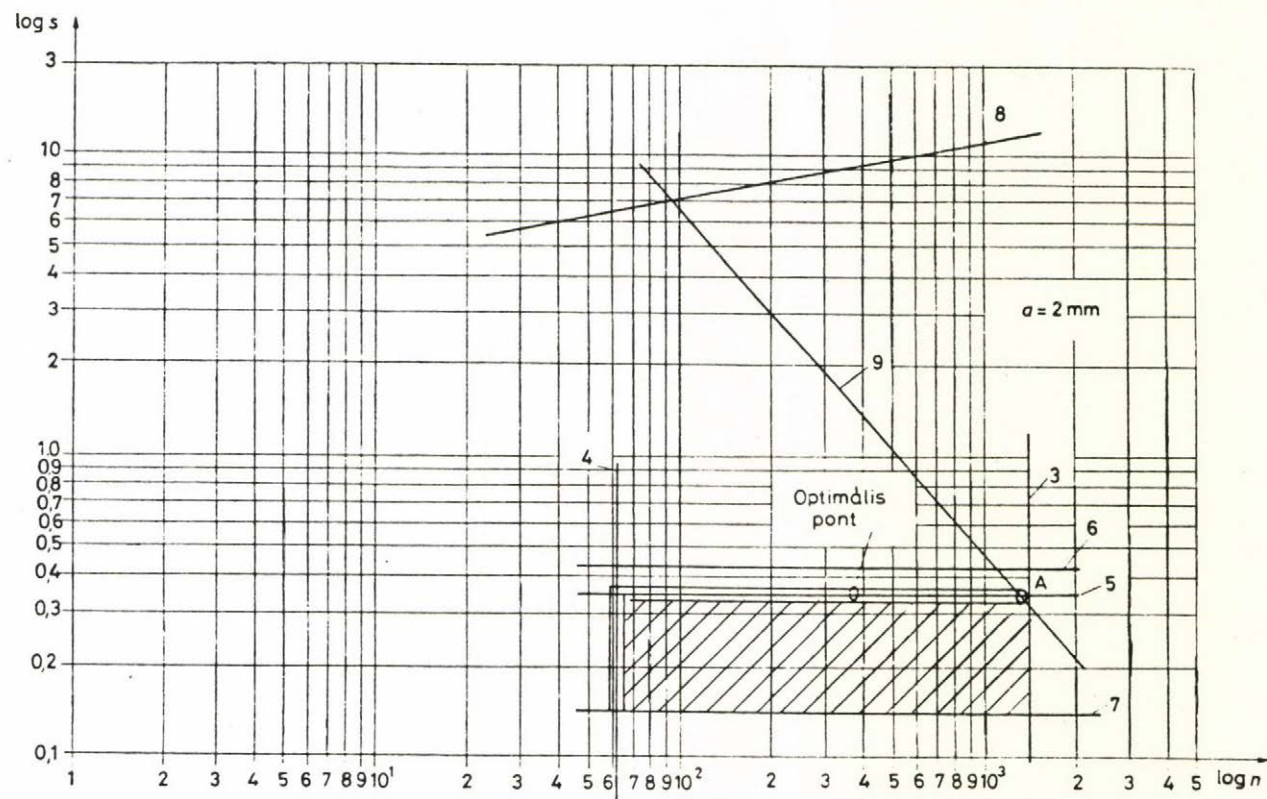
2.2.2.1.2. Az optimálás kézi vagy zseb- kalkulátoros módszerei

A technológiai adatok optimálásához szükséges matematikai modellek szigorúan ellenőrzött alapadatait korszerű technológiai információs rendszerek kell hogy szolgáltatassák.

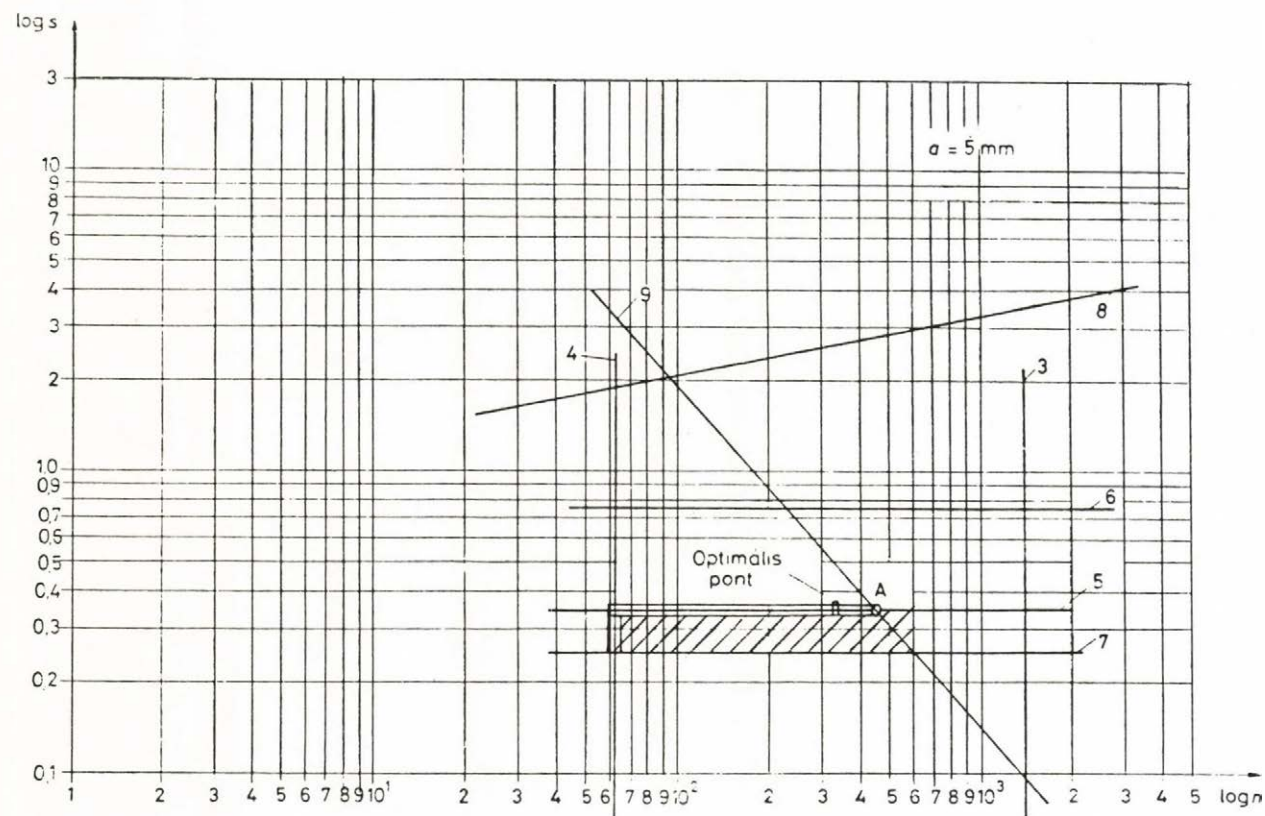
A modellek paramétereinek ismeretében azonban az optimális forgácsolási adatok igen egyszerű módon is meghatározhatók. Legyen adott a feltételrendszer a 2.1. pontban megadott módon, /2.29/ típusu egyenlőtlenséggel. Az egyenlőtlenségek határvonalai a $\log v - \log s$ síkban egyenesekkel ábrázolhatók. Így felrajzolható a forgácsolás megengedett tartománya. Meghatározható az optimumesélyes határvonal. A gyakorlat számára megfelelő pontossággal leolvashatók az optimumesélyes határvonalak metszéspontjainak koordinátái. Ezután a vázolt algoritmus alapján az optimális technológiai adatok meghatározása papír, ceruza, logarléc, vagy zsebkalkulátor segítségével könnyen elvégezhető.

Példa: Vizsgáljunk egy $d = 250$ mm átmérőn végzett hosszesztergálási műveletet $a = 2$ és $a = 5$ mm fogásmélységgel.

A szerszámgépről levehető teljesítmény $P = 11$ kW,



2.13. ábra. Optimalás grafoanalitikus módszerrel ($a = 2 \text{ mm}$)



2.14. abra. Optimális grafoanalitikus módszerrel ($a = 5 \text{ mm}$) (a): a határvonal kiűntetett pontjai (b)

az erőkorlát $F_{\text{meg}} = 6000 \text{ N}$.

A matematikai modell adatai:

$$x_F = 1,0; \quad y_F = 0,75; \quad z_F = -0,150; \quad C_F = 1330$$

$$x_V = 0,18; \quad y_V = 0,35; \quad C_V = 445,6; \quad m = 0,20;$$

$$C_T = 6,5$$

A feltételrendszer egyenlőtlenségei:

$$1. \quad s \leq 10,0;$$

$$2. \quad s \geq 0,01;$$

$$3. \quad n \leq 1400;$$

$$4. \quad n \geq 63;$$

$$5. \quad s \leq 0,35;$$

$$6. \quad sa^{-0,6} \leq 0,287;$$

$$7. \quad sa^{-0,6} \geq 0,096;$$

$$8. \quad s^{0,75} n^{-0,15} a d^{-0,15} \leq 1,9 \text{ /erőkorlát/}$$

$$9. \quad s^{0,75} n^{0,85} d^{0,85} a \leq 45372,2 \text{ /teljesítménykorlát/}$$

Az átmérőt és a fogásmélységet behelyettesítve a 6., 7., 8. és 9. összefüggések a következőket adják:

$a = 2 \text{ mm}$ esetén:

$$6. \quad s \leq 0,435;$$

$a = 5 \text{ mm}$ esetén:

$$s \leq 0,7538;$$

- | | |
|--------------------------------------|------------------------------------|
| 7. $s \geq 0,146$ | $s \geq 0,2521;$ |
| 8. $s^{0,75}_n^{-0,15} \leq 2,1749;$ | $s^{0,75}_n^{-0,15} \leq 0,86996;$ |
| 9. $s^{0,75}_n^{0,85} \leq 207,748;$ | $s^{0,75}_n^{0,85} \leq 83,099.$ |

A 2.13. és 2.14. ábrákon a forgácsolás megengedett tartományait tüntettük fel.

A koordináta tengelyekkel párhuzamos korlátozások ábrázolása rendkívül egyszerű. Néhány korlátozás az ábra területén nem tüntethető fel, ezek tekintetbe vétele természetesen felesleges. Az erőkorlátok a

$$\log s = 0,2 \log n + \frac{1}{0,75} \log 2,1749, \text{ valamint a}$$

$$\log s = 0,2 \log n + \frac{1}{0,75} \log 0,86996$$

összefüggés, a teljesítménykorlátok a

$$\log s = -1,133 \log n + \frac{1}{0,75} \log 207,748,$$

valamint a

$$\log s = -1,133 \log n + \frac{1}{0,75} \log 83,099$$

összefüggések alapján könnyen ábrázolhatók.

└

Vizsgáljuk először az $a = 2$ mm esetet.

A 2.13. ábrán az optimumesélyes határ dupla vonallal van kihuzva. Az első vizsgálandó pontot az 5 előtoláskorlát és a 9 teljesítménykorlát jelöli /A pont/. Itt:

$$s = 0,35 \text{ mm/ford}; n = 1300 \text{ ford/min.}$$

Az éltartam ebben a pontban

$$T_A = \left(\frac{445,6}{\frac{\pi \cdot 250}{1000} \cdot 1300 \cdot 0,35^{0,35} 2^{0,18}} \right)^5 = 0,0533 \text{ min}$$

lesz. Mivel az 5 egyeneshez tartozó optimális éltartam

$$T_{\text{opt}} = \frac{1-m}{m} C_T = 4C_T = 26 \text{ min,}$$

az A pont nem optimális.

A T_{opt} értékhez tartozó fordulatszám a Taylor-összefüggésből számítható:

$$n = \frac{C_v}{T_{\text{opt}}^m \frac{\pi d}{1000} s^{Y_v} a^{X_v}} = \frac{445,6 \cdot 1000}{26^{0,2} \cdot \frac{\pi \cdot 250}{1000} \cdot 0,35^{0,35} 2^{0,18}} =$$

$$= 376,92 \text{ ford/min.}$$

Mivel ez a fordulatszám a megengedett tartományhoz tartozik, az optimális technológiai adatok

$$s = 0,35 \text{ mm/ford}, n = 377 \text{ ford/min}$$

értékre adódnak.

Vizsgáljuk meg azt az esetet, amikor $a = 5 \text{ mm}$.
Ekkor a 2.14. ábra szerint az első vizsgálandó pontban /A/

$$s = 0,35 \text{ mm/ford}, n = 450 \text{ ford/min}$$

és az éltartam

$$T_A = \left(\frac{445,6}{\frac{\pi \cdot 250}{1000} 450 \cdot 0,35^{0,35} 5^{0,18}} \right)^5 = 4,699 \text{ min.}$$

Mivel az 5 egyeneshez tartozó optimális éltartam

$T_{\text{opt}} = 26 \text{ min}$, az A pont nem optimális.

A T_{opt} értékhez tartozó fordulatszám

$$n = \frac{446,6 \cdot 1000}{26^{0,2} \pi \cdot 250 \cdot 0,35^{0,35} \cdot 5^{0,18}} = 319,62 \text{ ford/min.}$$

Igy az optimális technológiai adatok

$$s = 0,35 \text{ mm/ford}, n = 319,62 \text{ ford/min.}$$

értékre adódnak.

2.2.2.1.3. Számítógépes optimálási módszerek

Az előző pontban bemutattuk, hogy maguknak az optimális technológiai adatoknak a meghatározása rendkívül egyszerű feladat. Természetesen ez a feladat csak akkor ilyen egyszerű, ha rendelkezésre áll - megfelelő formában - a konkrét körülményekre vonatkozó matematikai modell. Ha ezeket a modelleket megbízható adatokkal valamilyen információs rendszer szolgáltatja, akkor az optimális technológiai adatok meghatározhatók logarléccel, programozható zsebkalkulátorral, asztali kalkulátorokkal is.

Ahogy a felhasznált eszközök teljesítőképessége növekszik, úgy fokozódik az optimálási módszerek hatásossága is. Mivel a technológiai adatok meghatározása viszonylag egyszerű, de nagy tömegben, sok-sok esetre kell megoldani a feladatot, a felhasználó lehetőségeitől függően előtérbe kerülnek a nagyobb teljesítőképességű számítástechnikai berendezések.

Az egyszerű eszközök rendkívül jók arra, hogy a szakember számára közvetlen, szemléletes információt adjanak, hogy egyedi feladatok megoldása révén intuitív képességét fokozza. Átmenetet biztosí-

tanak a tömegszerű feladatok megoldásához a programozható számológépek.

Miniszámítógépek alkalmazásakor már lényegesen összetettebb szolgáltatásokat is elvárhatunk. A számítógép igen gyorsan képes sok műveletelem optimális adatainak meghatározására. Információt szolgáltat a megmunkálási folyamatról. Meghatározza a forgácsolás során ébredő erőket, a teljesítményt, a szerszám éltartamokat, a megmunkálás költségét, ennek összetevőit stb. Kivánatra technológiai változatok is képezhetők annak kiértékelésére, hogy az optimális adatoktól való eltérés milyen változásokat okoz a költségekben, szerszámkopásokban, megmunkálási időkben stb.

A számítógépes módszerek lehetővé teszik az adatkezelés egyszerűsítését. A matematikai modellek általános alakjait a számítógép tárolja és azokat a műveletelem jellemző adatai alapján automatikusan aktualizálja.

A közepes és nagy számítógépek lehetőséget teremtenek arra, hogy a technológiai adatok optimálását nagyobb tervező rendszerekbe beépítsék. Ezek a nagyobb rendszerek általában moduláris felépítésűek és az optimáló algoritmusok ezek moduljai.

A következőkben példákat mutatunk be, amelyeket

az MTA SZTAKI CDC-3300 típusu számítógépén futó optimálási program szolgáltatott.

2.4. táblázat

Számítógéppel optimált adatok

$$z_f = 0$$

Fogás- mélység	s, mm/ford	n, ford/min	v, m/min	T, min	F, N erő	P, kW teljesítmény	t, min megm. idő	K, Ft költség	J, ° eltolás-nutodás
1 mm	0,287 opt.	457,7	359,5	26,0 opt.	522	4,6	0,761	1,90	2,93
2 mm	0,35 opt.	376,9	296,0	26,0 opt.	1210	8,78	0,758	1,89	2,91
3 mm	0,35 opt.	315,57	247,85	43,87	1816	11 opt.	0,905	2,08	2,06
4 mm	0,35 opt.	236,68	185,89	142,72	2421	11 opt.	1,21	2,52	0,84
5 mm	0,35 opt.	189,34	148,71	356,31	3026	11 opt.	1,51	3,07	0,42

$$z_f = -0,150$$

1 mm	0,287 opt.	457,7	359,5	26,0 opt.	216	1,9	0,761	1,90	2,93
2 mm	0,35 opt.	376,9	296,0	26,0 opt.	516	3,74	0,758	1,89	2,91
3 mm	0,35 opt.	350,4	275,2	26,0 opt.	782	5,27	0,815	2,04	3,13
4 mm	0,35 opt.	332,7	261,3	26,0 opt.	1050	6,76	0,859	2,15	3,30
5 mm	0,35	319,6	251,0	26,0	1321	8,12	0,89	2,23	3,44

Megjegyzés: Az opt. jel azt mutatja, melyik mennyiségek határozzák meg az optimális pontot.

a/ Vizsgáljuk az előző pontban elemzett példát. Az optimálást arra az esetre is elvégeztük, amikor az erő értéke nem függ a forgácsolási sebességtől. Ha tehát $z_F = 0$, akkor az erő és a teljesítménykorlátok a következő alakúak lesznek:

$$8. \quad s^{0,75}_a \leq 4,5113$$

/erő/

$$9. \quad s^{0,75}_{nad} \leq 107700$$

/teljesítmény/

Az optimális technológiai adatokat $\varnothing 250$ mm kiinduló átmérőkből indulva $a = 1, 2, 3, 4$, és 5 mm fogásmélységekre határoztuk meg. Az eredményeket a 2.4. táblázatban közöljük. A megmunkálási költséget 100 mm hosszra számítottuk ki, a költségösszefüggés együtthatója $C_M = 2$ Ft/min.

A 2.4. táblázat bemutatja a számítógépes optimalás eredményeit. A részletes adatkiírás a szakember számára értékes információkat ad és lehetővé teszi az optimális adatok sokoldalú kiértékelését. A 2.4. táblázatból az is kitűnik, hogy a számítógép jól kimutatja a matematikai modell paramétereinek az optimális technológiai adatokra gyakorolt hatását. Adott esetben ez a $z_F = 0$ és $z_F = -0,15$ kitévő értékek hatásának a vizsgálatára vonatkozik.

A 2.4. táblázatból kiolvasható, hogy amikor $z_F = 0$, akkor az optimális forgácsolási sebességet csak $a = 1$ és 2 mm fogásmélységek esetében határozza meg az előtoláskorláton kapott szélsőérték pont. Nagyobb fogásmélységek esetén az optimális üzemmód a teljesítménykorláton való forgácsolás. Amikor $z_F = -0,15$, a teljesítményigény csökken és a forgácsolási sebességet az előtoláskorlát szélsőérték pontja szabja meg valamennyi $/1...5$ mm/ fogásmélységre.

2.5. táblázat

A maximális, minimális és optimális adatok
 $z_f = 0$

Fogás- mélység, mm	1 mm			2 mm			5 mm			
	Számít- tolt adatok	idő, min	költsé- g, Ft	elhasz- nálódás, %	idő, min	költsé- g, Ft	elhasz- nálódás, %	idő, min	költsé- g, Ft	elhasz- nálódás, %
Max.		16,53	33,07	0,0005	10,91	21,82	0,0012	6,30	12,59	0,0041
Min.		0,43	3,18	16,95	0,60	2,15	7,25	1,51	3,07	0,42
Opt.		0,76	1,90	2,93	0,76	1,89	2,92	1,51	3,07	0,42

$z_f = -0,15$

Max.	16,53	33,07	0,0005	10,91	21,82	0,0012	6,30	12,59	0,0041
Min.	0,49	3,18	16,95	0,40	5,58	36,71	0,62	3,13	14,46
Opt.	0,76	1,90	0,0011	0,76	1,89	2,92	0,89	2,23	3,44

Figyelembe ajánljuk a számszerű eredmények összehasonlítását. Táblázatunkban a szerszám elhasználódását is feltüntettük a megengedett kopás százalékában. A paraméterek hatása külön és részletes vizsgálatokat érdemel. Erre a jelen munka kereteiben nem nyílik lehetőség.

A 2.5. és 2.6. táblázatok példákat mutatnak arra, hogy milyen jellegű kiegészítő információkat nyújtanak az optimáló programok.

A 2.5. táblázat közli az elérhető legkisebb megmunkálási időt /maximális forgácsleválasztás/, valamint az ehhez tartozó költség és szerszámkopás adatait. Közli a lehetséges legnagyobb időt és az

2.6. táblázat

Technológiai adatok és jellemzőik egyes pontokban

$Z_f = -0,15$; $a = 2 \text{ mm}$

Pont	s , mm/ford	n , ford/min	v , m/min	T , min	F , N	P , kW	t , min	K , Ft	Δ , %
<i>a</i>	0,3345	1400	1099,56	0,040	409	11	0,214	70,16	536,4
<i>b</i>	0,35	1345,15	1056,48	0,045	426	11	0,212	61,90	472,9
<i>c, opt.</i>	0,35	376,9	296,0	26,0	516	3,74	0,758	1,89	2,92
<i>d</i>	0,35	63,0	49,48	199 309,0	674	0,82	4,535	9,07	0,0023
<i>e</i>	0,146	63,0	49,48	925 957,0	349	0,43	10,909	21,82	0,0012

$Z_f = -0,15$; $a = 5 \text{ mm}$

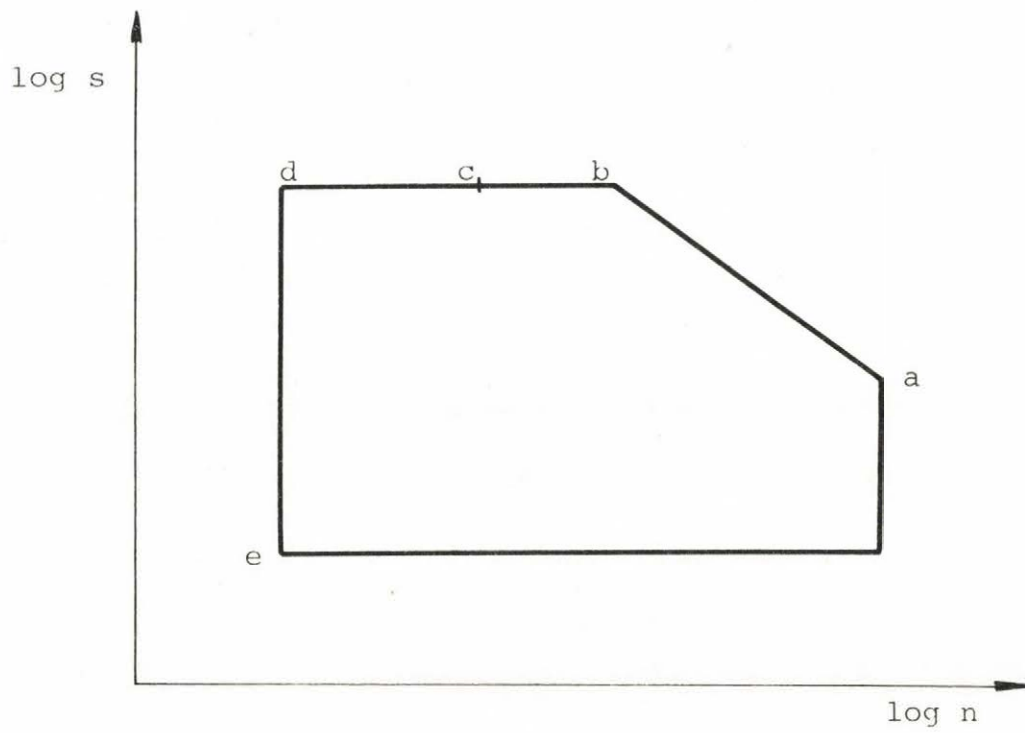
Pont	s , mm/ford	n , ford/min	v , m/min	T , min	F , N	P , kW	t , min	K , Ft	Δ , %
<i>a</i>	0,252	611,32	480,13	1,803	937	11	0,649	5,98	35,98
<i>b</i>	0,35	457,73	359,50	4,316	1252	11	0,624	3,13	14,46
<i>c, opt.</i>	0,35	319,61	251,02	26,00	1321	8,2	0,893	2,23	3,44
<i>d</i>	0,35	63,0	49,48	87 373,9	1686	2,04	4,535	9,07	0,0052
<i>e</i>	0,252	63,0	49,48	155 098,0	1318	1,59	6,295	12,59	0,0041

ehhez tartozó költség és szerszámkopás adatokat is.

A korábban ismertetett optimálási módszerből világos, hogy a legkisebb megmunkálási idő az optimumesélyes határvonal jobb szélső pontjában, vagyis az MKGS-rendszer fizikai lehetőségeinek maximális kihasználásakor érhető el. Amikor valamilyen okból mód van az igen alacsony terheléssel való forgácsolásra /nincs munkával leterhelve a gép/, akkor éppen ellenkezőleg, az optimumesélyes határvonal bal szélső pontja határozza meg a legcélszerűbb forgácsolási adatokat.

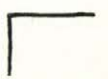
A 2.6. táblázat a megengedett tartomány határvonalának néhány pontjában mutatja a forgácsolási adatokat és az ezek alapján kiszámítható jellemző mennyiségeket. Ezek a pontok /lásd a 2.15. ábrát/, az "a" pont kivételével, az optimumesélyes határvonal jellemző pontjai.

A közölt adatokból jól követhető, hogy az optimális adatoktól /c pont/ való eltérés miként hat a költségekre, de egyben az is, hogy a megmunkálási idő alacsony szerszámelhasználódáshoz vezet.



2.15 ábra

Az optimumesélyes pontok



2.2.2.2. Paraméteres optimálás. Nomogramok forgácsolási adatok meghatározására

Az előző pontokban bemutattuk, hogyan lehet az optimális forgácsolási adatokat meghatározni ismert fogásmélység mellett. A technológus számára fontos lehet az is, hogyan változnak a technológiai adatok akkor, amikor a fogásmélység változik.

Ha valamely műveletelemre ismert a megmunkálás matematikai modellje, akkor a fogásmélység - mint független változó - függvényében könnyen meghatározható az optimális előtolás és forgácsolási sebesség értékek alakulása.

Ilyen feladatnál a fogásmélység mint paraméter szerepel, amelynek értékétől függnek az optimális megoldások. Ezért a problémát paraméteres optimálásnak neveztük el.

A feladat numerikusan igen hatásosan oldható meg a vázolt optimálási módszerrel. Ezen túlmenve azonban tűzzük ki feladatul, hogy minőségileg is elemezzük a fogásmélység hatását az optimális előtolás és sebesség értékekre.

Vizsgáljuk a forgácsolási folyamat feltételrendszerét a /2.29/ alakban. Amikor a fogásmélység ismert, a korlátok meghatározott értékeket vesznek

fel, mint ahogy ez a /2.29/ összefüggésben látható.

A

$$G_j \min \leq s^{y_j z_j} \leq G_j \max$$

$$j = 1, 2, 3 \dots$$

összefüggés helyett /ahol az y_j , z_j kitevők a feltételrendszer egyenlőtlenségeinek kitevői, $G_j \max$,

$G_j \min$ pedig a megfelelő korlátértékek/, a fogásmélységet mint független változót kezeljük, a feltételrendszer a következő alakú lesz:

$$\frac{E_i \min}{a x_i} \leq s^{y_i} \quad v^{z_i} \leq \frac{E_i \max}{a x_i} \quad /2.33/$$

$$i = 1, 2, 3 \dots$$

A fogásmélység valamely lehetséges legkisebb értéktől az alkalmazható legnagyobb értékig való változásakor a forgácsolás megengedett tartományának határai is változnak.

A korábbiakban ismertetett optimálási módszer levezetésekor kimutattuk, hogy az optimális pont mindig valamilyen két konkrét korlátozás közös pontja, vagy valamelyik korlátozás lokális szélsőérték pontja. Ha a fogásmélység értéke adott, akkor az optimális s előtolás, v forgácsolási sebesség értékek könnyen meghatározhatók.

Most próbáljuk meg levezetni, hogyan alakulnak az optimális előtolás és forgácsolási sebesség értékek a fogásmélység "a" mint független változó függvényében. Ebből a célból levezetjük, hogyan alakul két tetszőleges korlátozás közös pontjában az előtolás és a forgácsolási sebesség értéke a fogásmélységtől függően.

Vizsgáljuk a j-edik és a k-adik korlátozásokat. A két korlátozás közös pontja az

$$\frac{s^{y_j} v^{z_j}}{a^{x_j}} = \frac{H_j}{a^{x_j}} \quad /2.34/$$

$$\frac{s^{y_k} v^{z_k}}{a^{x_k}} = \frac{H_k}{a^{x_k}}$$

egyenletekből határozható meg, ahol H_j az éppen aktuális korlátozás, tehát $E_j \max$ vagy $E_j \min$, hasonló módon H_k , $E_k \max$ vagy $E_k \min$. Logaritmikus transzformáció után

$$y_j \log s + z_j \log v = \log H_j - x_j \log a$$

$$y_k \log s + z_k \log v = \log H_k - x_k \log a.$$

Innen:

$$\log s = \frac{z_k \log H_j - z_j \log H_k + (z_j x_k - z_k x_j) \log a}{y_j z_k - y_k z_j}$$

/2.35/

$$\log v = \frac{y_j \log H_k - y_k \log H_j + (y_k x_j - y_j x_k) \log a}{y_j z_k - y_k z_j}$$

Hasonló összefüggés alapján határozhatók meg az egyes korlátozások szélsőérték pontjai is. Ekkor a /2.34/ összefüggés egyik egyenletét a szélsőértékhez tartozó éltartamegyenlettel célszerű helyettesíteni. Ily módon a /2.34/ egyik egyenlete helyett a

$$T_{szj}^m = \frac{C_{vj}}{y_{vj}^a x_{vj}} \quad /2.36/$$

összefüggést kell felhasználni, ahol /2.32/ szerint

$$T_{szj} = \frac{y_j - y_{vj} y_j - (y_j - z_j)^m}{m(y_j - z_j)} C_T.$$

Innen

$$y_{vj}^a = \frac{C_{vj}}{T_{szj}^m x_{vj}} \quad /2.37/$$

Igy pontosan ugyanolyan alakú összefüggést kaptunk, mint /2.34/ bármelyik egyenlete.

$$y_j = y_{vj}; \quad z_j = 1; \quad H_j = \frac{C_{vj}}{T_{szj}^m}; \quad x_j = x_{vj}.$$

A /2.37/ egyenletet és az adott korlátozást jellemző egyenletet megoldva, alakilag a /2.35/ összefüggéssel

azonos kifejezést kapunk. A /2.35/ összefüggésből kitűnik, hogy az optimális előtolás és sebesség, valamint a fogásmélység logaritmusainak összefüggését egyenesek ábrázolják, azaz

$$\log s = C_1 + C_2 \log a \quad /2.38/$$

$$\log v = C_3 + C_4 \log a,$$

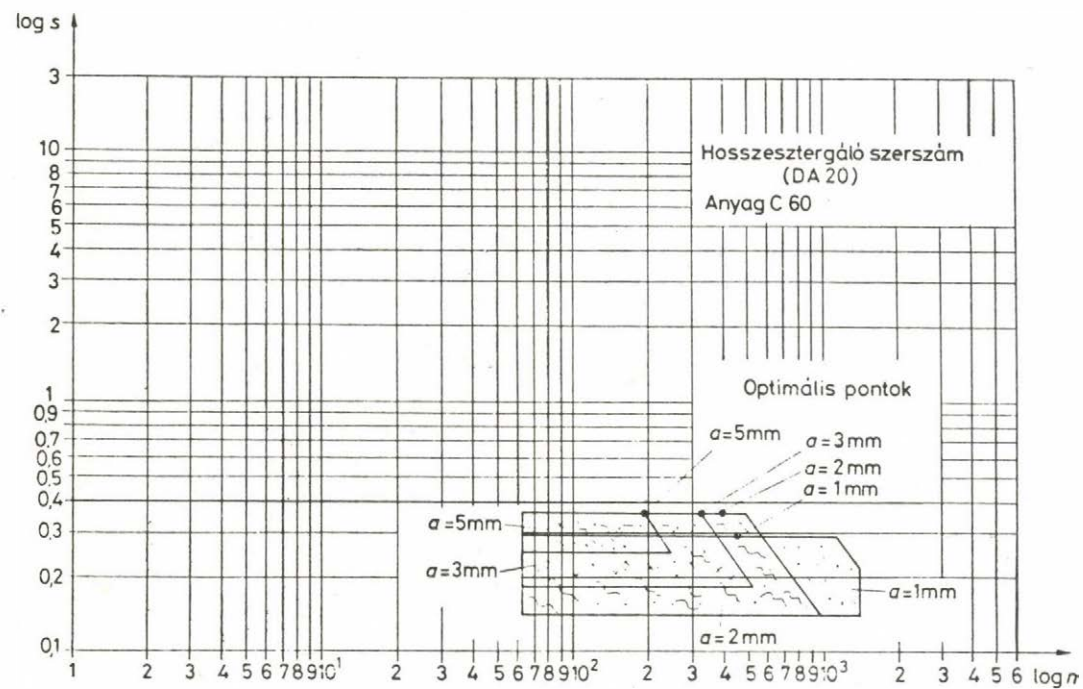
ahol a C_1, C_2, C_3, C_4 együtthatókat a /2.35/ összefüggések tartalmazzák.

$$C_1 = \frac{z_k \log H_j - z_j \log H_k}{Y_j z_k - Y_k z_j},$$

$$C_2 = \frac{z_j x_k - z_k x_j}{Y_j x_k - Y_k z_j},$$

$$C_3 = \frac{Y_j \log H_k - Y_k \log H_j}{Y_j z_k - Y_k z_j},$$

$$C_4 = \frac{Y_k x_j - Y_j x_k}{Y_j z_k - Y_k z_j}.$$



2.16. ábra. Az optimális pontok különböző fogásmélységek mellett

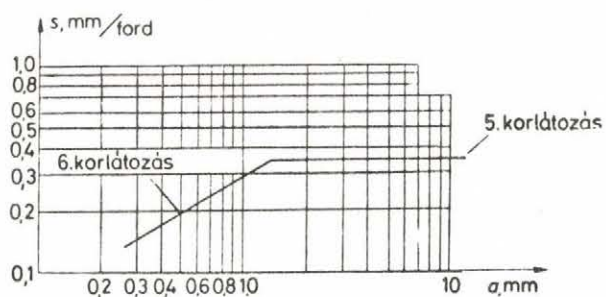
Mivel a fogásmélység valamely tartományában az optimális technológiai adatokat bizonyos korlátozások vagy szélsőérték pontok szabják meg, ugyanezekben a tartományokban az optimális előtolásokat és sebességeket a $\log s - \log a$ vagy a $\log v - \log a$ síkban egyenes szakaszok ábrázolják.

A 2.2.2.1.2. pontban említett példa adatait felhasználva /de $z_F = 0$ mellett/ az optimális pontok jellegének alakulását a 2.16. ábra szemlélteti.

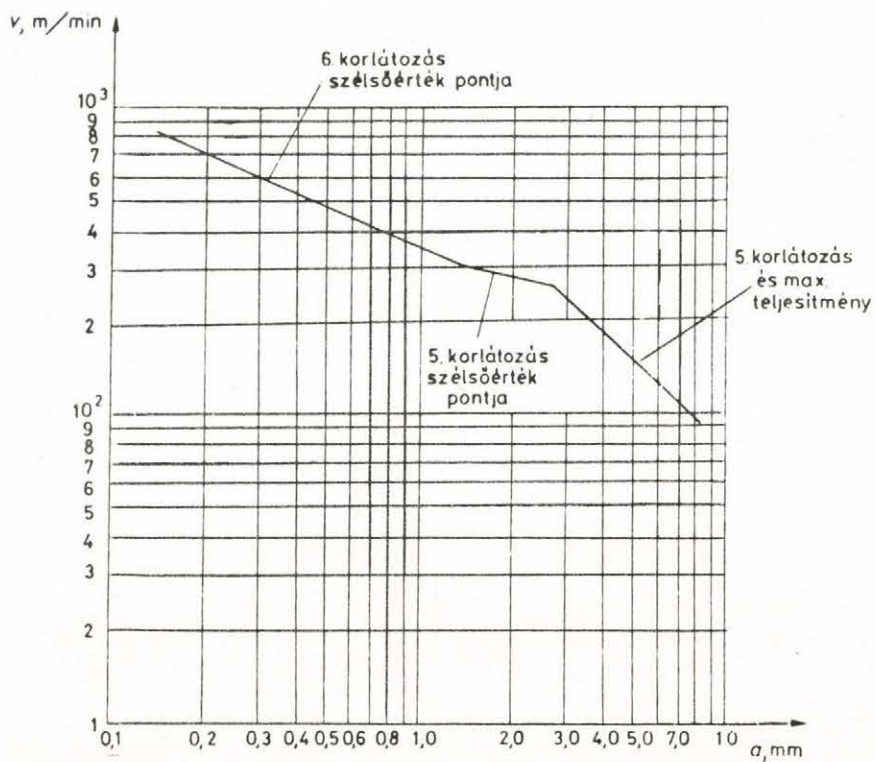
1 mm fogásmélység mellett az optimális technológiai adatokat a 6 korlátozás szélsőérték pontja, 2 mm fogásmélység esetén a 5 korlátozás szélsőérték pontja, 3 és 5 mm fogásmélység mellett pedig az 5 előtoláskorlát és a teljesítménykorlát metszéspontja szabja meg.

Az optimális előtolás és sebesség nomogramokat a 2.17. és 2.18. ábrán mutatjuk be.

Az ábrák vízszintes tengelyén a fogásmélység, függőleges tengelyén az előtolás és a forgácsolási sebesség optimális értékei vannak. Valamely konkrét fogásmélységnél a két ábrából megkapjuk az összetartozó előtolás és forgácsolási sebesség értékeket. A példa külső nagyoló esztergálásra készült, amelyet adott szerszámgépen /ERI-250 típusu NC eszterga/, meghatározott szerszámmal /anyaga

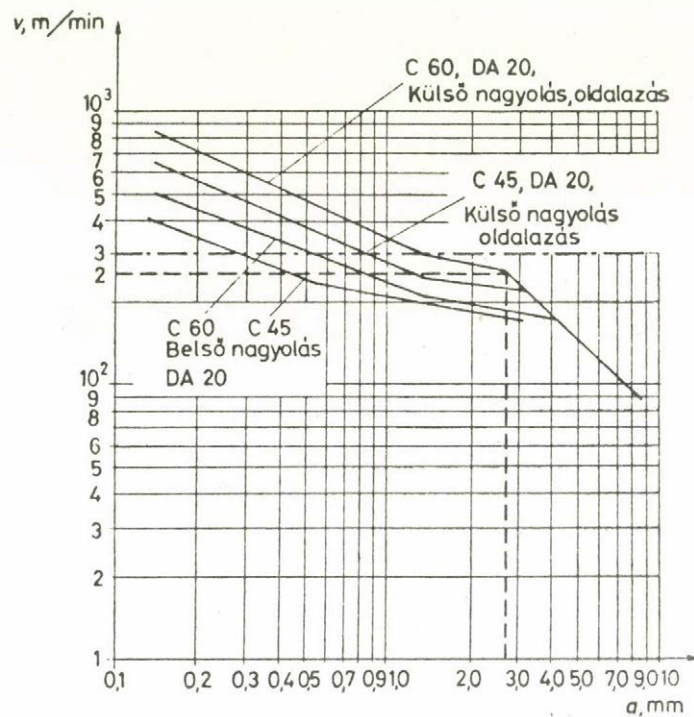


2.17. ábra. Az optimális előtolás nomogramja



2.18. ábra. Az optimális sebesség nomogramja

DA 20/, adott munkadarabon /anyaga C45 és C60/
végeznek. Az előtolás nomogram nemcsak külső, hanem
belső nagyolásra is érvényes. Összetett sebesség
nomogramot a különböző megmunkálási módokra a 2.19.
ábra mutat be.



2.19. ábra. Összesített sebességnomogram

Mint említettük, egy-egy nomogram csak adott
matematikai modellre, tehát rögzített megmunkálási
feltételekre érvényes. Vannak azonban olyan válto-
zások, amelyek a nomogramokat nem érintik vagy csak

egyes elemeiket változtatják meg. Így elkészíthetők olyan nomogram gyűjtemények, amelyek a megmunkálási esetek jelentős részét lefedik viszonylag korlátozott terjedelem mellett.

A nomogramok töréspontjai konkrét megmunkálási módokra analitikusan is meghatározhatók. Erre vonatkozóan a [2.13] munka tartalmaz fejtegetéseket. A nomogram készítés legegyszerűbb útja azonban mégis az, hogy különböző fogásmélységekre meghatározzuk az optimális előtolás és forgácsolási sebesség értékeket és azokat log-log koordináta rendszerben ábrázoljuk. Mivel a nomogramok egyenes szakaszokból állnak, hiányzó részeik pótlása egyszerű feladat.

Természetesen a feltételrendszer egyes korlátozásainak hatása a nomogramok alakulására analitikusan is értékelhető, mint erre példákat a szerző a [2.13] munkában közöl.

A 2.17., 2.18. ábrákon közölt nomogramokból könnyen felépíthetők az optimális adatokkal végzett forgácsolás szerszám-éltartam és költség jellemzői. Könnyen belátható, hogy az optimális éltartam és a fogásmélység logaritmusainak összefüggését szintén szakaszosan lineáris függvény jellemzi.

Igy például az elemzett példa esetében az éltartam és a költségfüggvények ala-

kulását a 2.20 ábra szemlélteti.

Érdekes megfigyelni, hogy a vázolt módszer módot nyújt a feltételrendszer azon korlátozásainak a kiküszöbölésére, amelyek nem vesznek részt az optimális forgácsolási adatok kialakításában.

Igy az elemzett példa esetében az 5., 6. és 9. számmal jelzett korlátozások szerepeltek. Ezeken az ún. mértékadó korlátozásokon kívül a többiek elhagyhatóak, szerepük nincsen.

Ily módon a javasolt módszer alkalmas a matematikai modellek egyszerűsítésére.

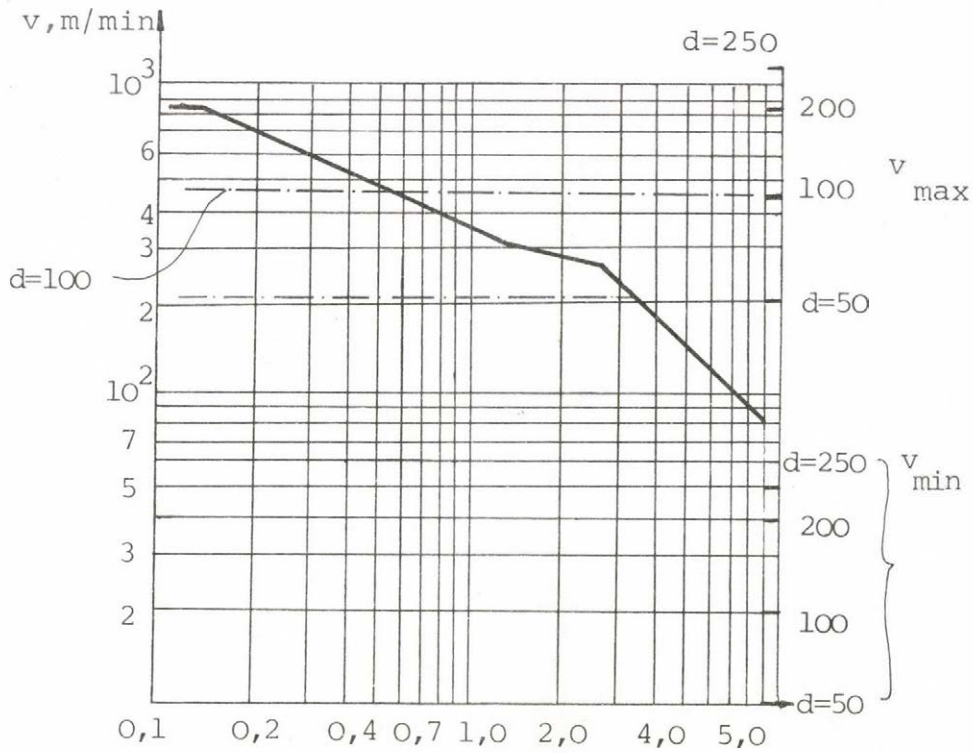
2.2.2.2.1. A paraméteres optimálás egyéb esetei

A vázolt módszer nemcsak a fogásmélység változását feltételezve alkalmazható.

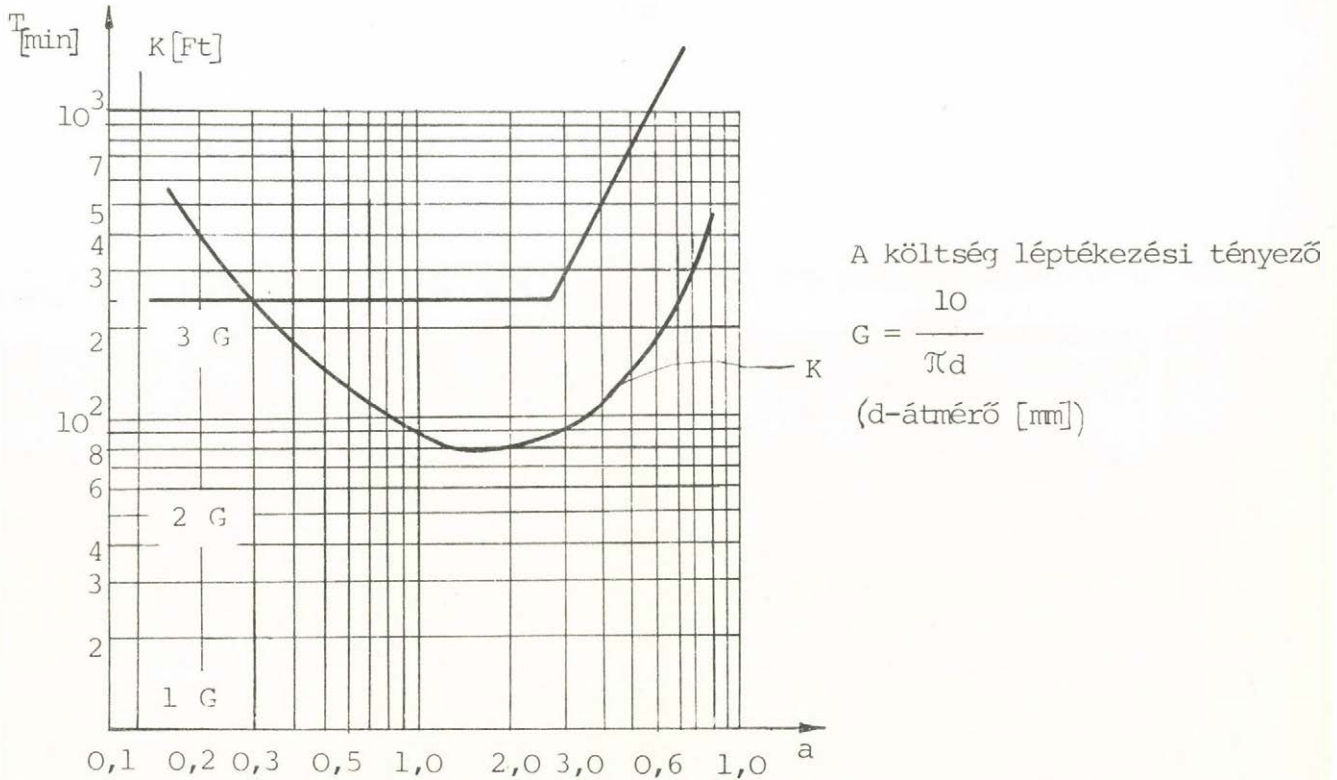
A taglaltak teljességgel érvényben maradnak, ha a feltételrendszerben szereplő bármilyen más mennyiséget tekintünk független változónak.

Igy például elemezhető az optimális forgácsolási adatok változása az átmérő, vagy az összefüggések /például az anyag forgácsolhatóságát jellemző/ valamelyik együtthatója változásának függvényében.

Mivel a /2.57./ korlátozások közös pontjával, vagy a korlátozások szélsőérték pontjával kapcso-



2.20. ábra Az átmérő hatása a nomogramra



2.21 ábra Megmunkálási költség és a szerszám éltartam nomogramok

latban taglaltak érvényesek akkor is, ha azokat a

$$s_{i_v}^{y_i} z_j = \frac{J_j}{f_j^{u_j}}$$

/2.39/

$$s_{k_v}^{y_k} z_k = \frac{J_k}{f_k^{u_k}}$$

kifejezésekre vonatkoztatjuk, ahol

f az aktuális átmérő d, vagy a képletekben szereplő valamely más mennyiség, például C_F , C_V stb.

Az előzőekben közölt bizonyítások szerint az optimális előtolás és sebesség a független változó szakaszosan lineáris függvénye.

Példa. Vizsgáljuk a 2.2.2.1.2. pontban elemzett példát.

Ebben az esetben szükségtelen annak az egyszerű, de esetenként felesleges fáradsággal járó eljárásnak az alkalmazása, hogy a független változót meghatározott módon változtatjuk /például: adott határok között állandó lépésközzel/ és az optimális előtolások és sebességek numerikusan meghatározott értékei alapján építjük fel a nomogramokat.

Az elemzett példánál mód nyílik egyszerű analitikus összefüggések feltárására.

Az átmérő explicite csak a 3. és 4. korlátozásokban szerepel. Vagyis

$$\frac{\pi d n}{1000} \leq \frac{\pi d}{1000} 1400 ; \quad \frac{\pi d n}{1000} \geq 63$$

$$v \leq 1,4 \cdot \pi d$$

$$v \geq 0,063 \cdot \pi d$$

A számítások alapjául szolgáló $d = 250$ mm átmérőnél ez:

$$v_{\min} = 49,48 \leq v \leq 1099,56 = v_{\max}$$

Bármilyen más átmérőnél a v_{\max} , v_{\min} korlátok könnyen kiszámíthatóak és az ábrára felvihetőek.

A 2.21. ábrán bemutatjuk, hogy az adott példa esetében csak az fordulhat elő, hogy az átmérő csökkenése miatt a kisebb fogásmélységeknél az adott gépen alkalmazható maximális sebesség $/v_{\max}/$ alkalmazása az optimális.

Vizsgáljuk az anyag forgácsolhatóságát jellemző C_F és C_V paraméterek hatását a nomogramok alakulására.



Tételezzük fel, hogy a paraméterek az alap nomogramok felépítésekor felvett névleges értékük körül a

$$C_{Fuj} = q \cdot C_{Frégi} \text{ és } C_{Vuj} = r \cdot C_{Vrégi}$$

összefüggés szerint változnak / q, r pozitív számok/.

Mint ez a /2.3/ összefüggésből is látható, a C_F együttható változása a 8. és 9. korlátozások

$$8. \quad s^{0,75}_n \cdot d^{-0,15}_a \leq \frac{1,9}{q} \quad \text{/erőkorlát/}$$

$$9. \quad s^{0,75}_n \cdot d^{0,85}_a \leq \frac{45 \cdot 372,2}{q} \quad \text{/teljesítménykorlát/}$$

változását okozza.

Könnyen belátható, hogy az optimális technológia kialakításában az adott esetben csak a teljesítménykorlát kap szerepet.

Igy

$$v_{opt}^{0,85} = \frac{M}{s_{opt}^{0,75}_a \cdot q},$$

ahol

$$M = \frac{45 \cdot 372,2 \cdot \Pi^{0,85}}{1000^{0,85}}$$

Mivel adott "a" érték esetén az s_{opt} értékek az adott esetben nem változnak C_F változásával

$$v_{opt\ q} = \frac{v_{opt1}}{q^{1/0,85}},$$

ahol

v_{optq} az optimális sebesség adott q értéknél,

$v_{opt1} = v_{opt}$, ha $q = 1$.

$$v_{opt1} = \frac{M^{1/0,85}}{s_{opt\ a}^{0,75}} = \frac{M^{1,18}}{s_{opt\ a}^{0,75}}$$

A fentiek alapján

$$\log v_{optq} = \log v_{opt1} - 1,18 \cdot \log q.$$

Igy a nomogramon v_{optq} az eredeti v_{opt} értékeket adó egyenessel párhuzamos.

A különböző q értékekre vonatkozó nomogram ágak felépítésének legegyszerűbb módja az, ha egy pontban meghatározzuk a v_{optq} értékeket és párhuzamost húzunk az eredeti $/q = 1/$ nomogramokkal. Az új nomogram ágak az eredeti nomogram adott együttható által nem befolyásolt szakaszáig terjednek.

Az adott esetben például, ha $v_{opt} = 100$, $q = 0,5; 0,75; 1,5; 2$ értékekre $v_{opt.q} = 252,27; 140,85; 62,11$ és $44,05$.

A nomogramokra felvihetőek a v_{opt} egyenesekkel párhuzamos egyenesek, amelyek az optimális sebességet adják a C_F együttható változásakor.

Amikor $q = 0,5; 0,75; 1,5$ és 2 ; $C_F = 665; 997,50; 1995$ és 2660 rendre.

Az adott esetben a C_F együttható változásával azonos hatást gyakorol a nomogramok alakulására a megengedett teljesítmény változása is. Mivel az eredeti nomogram $P = 11$ kW teljesítményre vonatkozik a $q = 0,5; 0,75; 1,5; 2$ értékek a $P = 5,5; 8,25; 16,5; 22$ kW megengedett teljesítmény mellett érvényes nomogramokat jelölik ki.

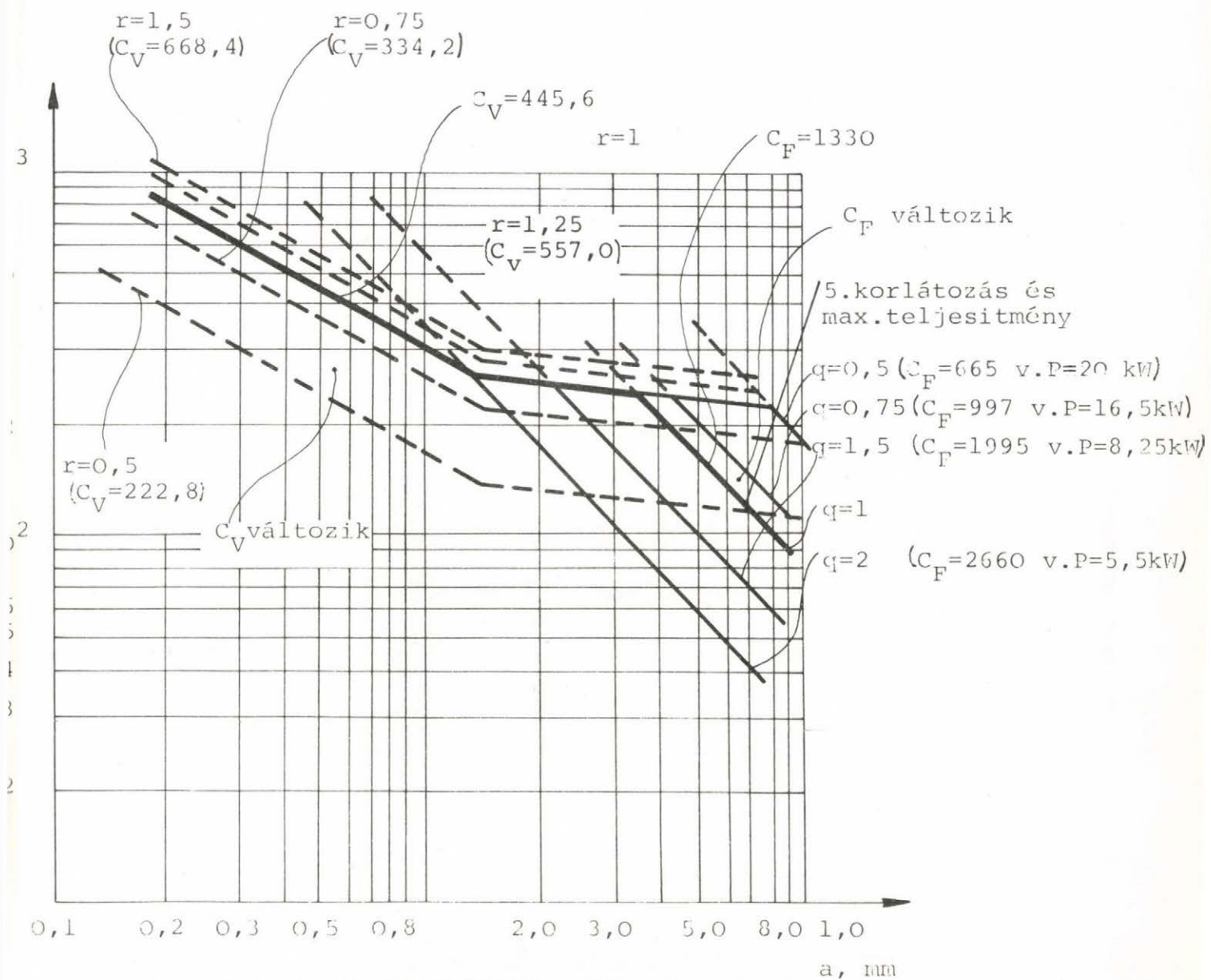
Amikor C_v változik, még egyszerűbb a helyzet. C_v változása a nomogram első két szakaszán érezteti hatását.

Mivel

$$v = \frac{C_v}{T_s^m y_a x_v}$$

$$v_{optr} = v_{optl} \cdot r.$$

Az előzőekhez hasonlóan az eredeti nomogramok-



2.22 A C_V és C_F együtthatók változásának hatása



kal párhuzamos egyenesek alkotják az új C_v változását tükröző nomogramokat.

A 2.22 ábrán a nomogramok $r = 0,5; 0,75; 1,25$ és $1,5$ értékekre vannak feltüntetve. Ezeknek a $C_v = 222,8; 334,2; 557,0$ és $668,4$ értékek felelnek meg.

A vázolt módszer rendkívüli módon alkalmas a matematikai modell paramétereinek hatásának értékelésére a megmunkálási adatokra.

Természetesen a következtetésekkel óvatosan kell bánni. Általában a vizsgálandó változások nem olyan drasztikusak, mint a szemléltetésképpen bemutatott 2.22 ábrán látható esetben. Ám még kisebb változásokkor is ellenőrizni kell, hogy a változások nem eredményezik-e a matematikai modell érvényességi tartományból való kilépést. Például az adott esetben előfordulhat, hogy kis fogásmélységek esetén a hőmérséklet korlátok, amelyeket a modell nem tartalmaz, éreztetni kezdik hatásukat.

Az összetett nomogramokból egy-egy konkrét

esetre a megfelelő szakaszok kombinálásával kaphatók meg az egyedi nomogramok. Erre példát a 2.23. ábra mutat.

Az előzőekhez hasonló számítások után bármilyen C_F , C_V értékpárra könnyen felépíthetők a nomogramok. Például $C_F = 1500$, $/q = 1,13/$ és $C_V = 400$ $/r = 0,90/$ értékekre ezt bemutatjuk a 2.23. ábrán.

Az adott példa esetében az eddigiekhez hasonlóan kezelhető a Taylor-kitevő változásának hatása is. Itt az m kitevő értéke csak a sebesség nomogram kis fogásmélységekből számított első két szakaszán érezheti hatását. Mivel ezeken ismertek az adott "a" értékekhez tartozó s_{opt} , T_{opt} értékek, az optimális forgácsoló sebesség kiszámítható:

$$v_{opt} = \frac{C_V}{T_{opt}^m a^{x_v} s_{opt}^{y_v}} .$$

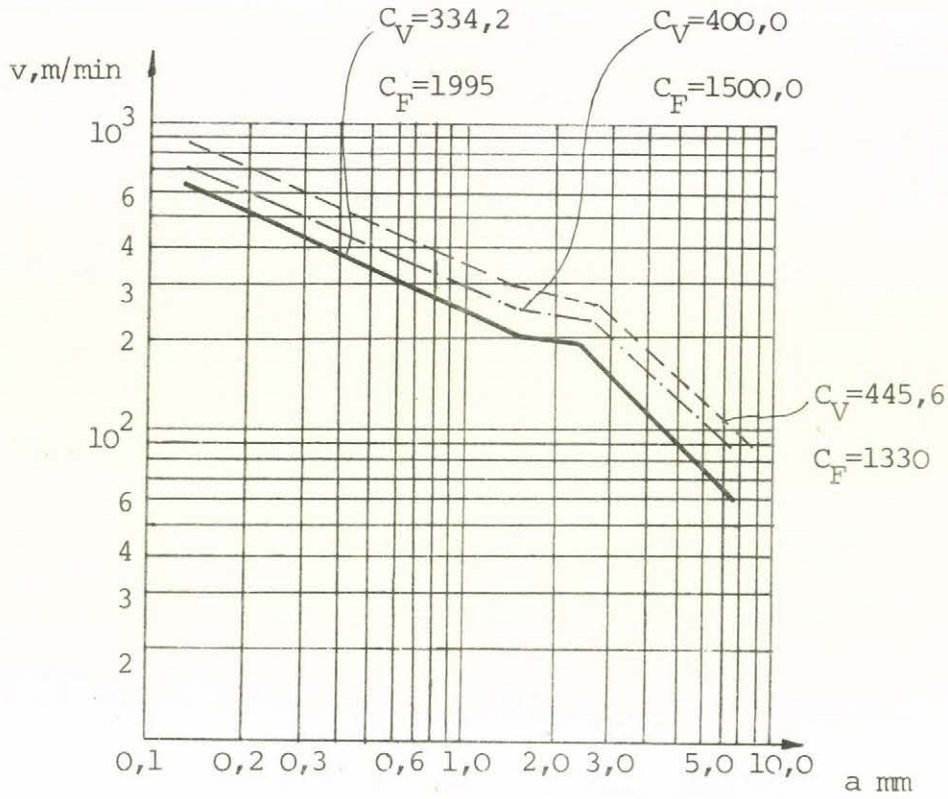
Ha

$$m_{uj} = m_{régi} + p,$$

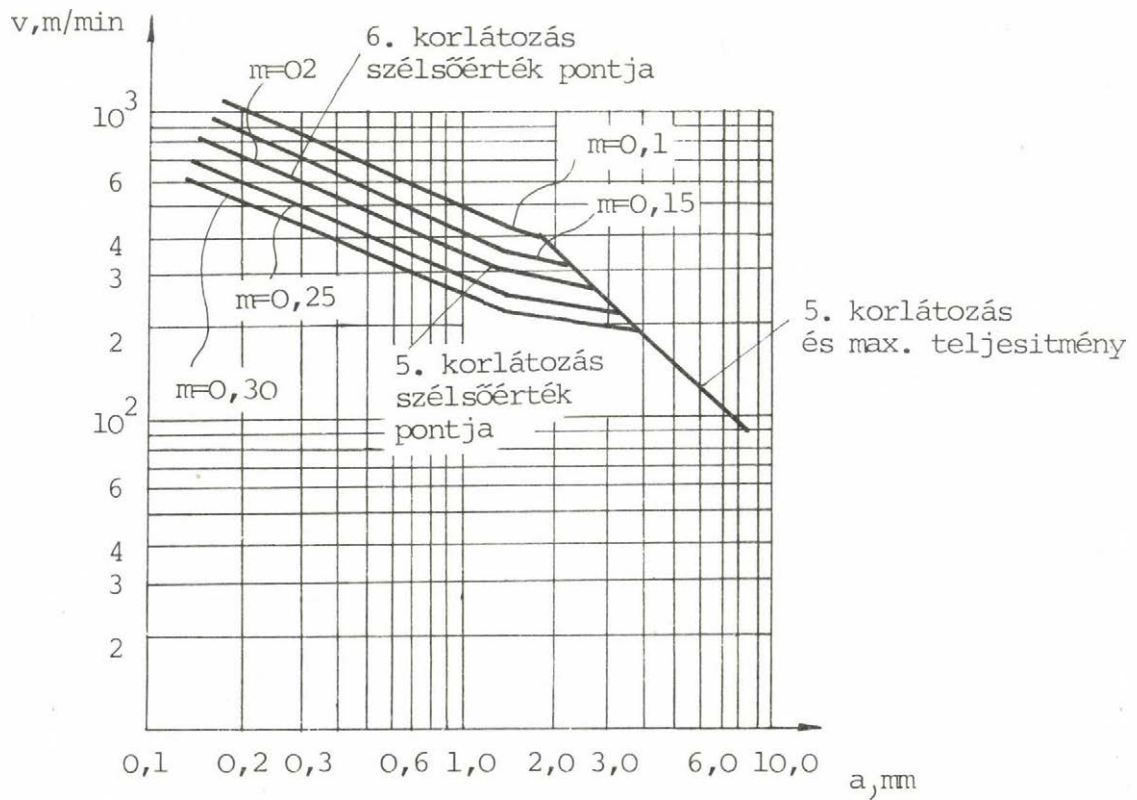
akkor

$$v_{opt\ p} = \frac{C_V}{T_{opt}^{m+p} a^{x_v} s_{opt}^{y_v}}$$

$$v_{opt\ p} = \frac{1}{T_{opt}^p} v_{opt\ 0}$$



2.23. ábra



2.24. ábra Az m Taylor-kitevő hatása az

$$\log V_{\text{opt } p} = \log \frac{1}{T_{\text{opt}}^p} + \log V_{\text{opt } 0}.$$

Igy könnyen felépíthetők az m változását tükröző nomogram ágak.

Erre példát a 2.24. ábra mutat.

Általában a Taylor-kitevő változásának hatása az adott módon nem vizsgálható. A paraméteres optimalás alapösszefüggéseiben /lásd /2.37// a Taylor-kitevő hányadosfüggvényben és hatványkitevőként szerepel. Így a levezetettek erre az esetre érvénytelenek. Az optimális adatok és paraméterek logaritmusainak szakaszosan lineáris jellege csak konkrét esetekre lehet érvényes.

Az adott példára bemutattuk, hogy a módszer lehetővé teszi, kisebb levezetés után, rendkívül tömör formájú információt nyújtó nomogram család felépítését.

Erre, úgy tűnik, nagyon sok esetben, különböző megmunkálási módoknál, lehetőség nyílik.

Amikor az analitikus egyszerűsítések nehézségekbe ütköznek, mindig alkalmazható a közvetlen numerikus optimalás és a szakaszosan lineáris nomogramok felépítésének munkaigényes, de könnyen megvalósítható /brute force/ módszere.

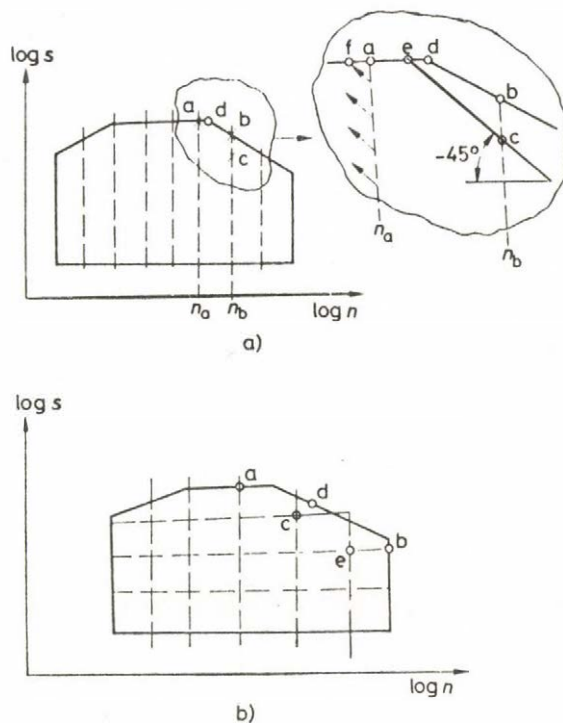
2.2.2.3. Optimálás más matematikai modellek esetében

Az eddigiekben elemzett optimálási módszer feltételezi, hogy a rendszer matematikai modelljét a korábbi pontokban leírt módon határoztuk meg. A módszer több alapgondolata más matematikai modellek esetében is alkalmazható.

a/ Diszkrét főorsóhajtásokra a módszer igen egyszerűen általánosítható. Az 1. és 2. tételek alapján az optimális fordulatszám a fokozatmentes főhajtásra kapott d ponttal szomszédos kisebb vagy nagyobb fordulatszámnak megfelelő a vagy d pontban lesz. Az optimális előtolást az optimumesélyes határvonalon levő pont határozza meg. Nagyon ritkán előfordulhat, hogy az optimális előtolást a fokozatmentes eset felletti n_b fordulatszám-egyenesen kapott lokális szélsőérték pont határozza meg / c pont a 2.25a ábrán/.

Kiszámítható tehát a célfüggvény értéke az a , b és c pontokban /a c pontban csak akkor, ha a megengedett tartományon belül van/. Optimális az a pont, amelyre a célfüggvény értéke a legkisebb.

A fentiek bizonyítása rendkívül egyszerű. Mivel az optimumesélyes határvonalon a célfüggvény az optimális pont felé haladva monoton jelleggel csökken,



2.25. ábra. Az optimális pontok helye diszkrét fordulatszám és előtolássor esetén

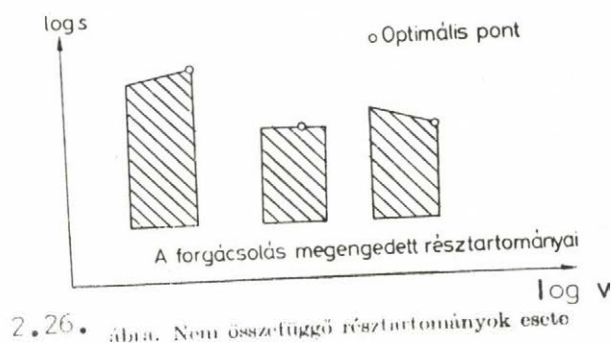
ezért a határvonalon a célfüggvény csak a folytonos optimumponttal szomszédos két diszkrét fordulatszám mellett veheti fel a lehetséges legkisebb értéket /a és b pontok/. Vizsgáljuk most azt, hogy a megengedett tartományon belül lehet-e más pont, amelyben a célfüggvény értéke kisebb, mint az a vagy a b pontokban.

Az a pontokhoz tartozó fordulatszám mellett ilyen pont nem létezhet, mert a -45° -os meredekségű egyenesek mentén felfelé haladva a célfüggvény értéke egyre csökken és még így is olyan f pontokba jutunk, amelyekben a célfüggvény értéke nagyobb, mint az a pontban. Így az n_a egyenes bármely tartományon belüli pontjában /lásd a 2.25a ábrát/, a célfüggvény értéke nagyobb, mint az a pontban. Ugyanez nem igaz az n_b egyenesre, mert ennek lokális szélsőérték pontjából /amelyben a célfüggvény értéke kisebb, mint a b pontban/ a -45° -os egyenes mentén elvileg eljuthatunk az optimumesélyes határ olyan e pontjába, amelyben a célfüggvény értéke kisebb, mint az a pontban. Ezért olyan esetekben, amikor az e -a szakaszon a célfüggvény növekedése nagyobb, mint az e -c szakaszon, az optimális pont nem az a -ban, hanem a c -ben lesz. Könnyen belátható - esetleg a fentihez hasonló elemzéssel is -, hogy n_a -nál kisebb és n_b -nél nagyobb fordulatszámok mellett a forgácsolás megengedett tartományán belül nem találhatunk olyan pontot, amelyben a célfüggvény értéke kisebb lenne, mint az a , b vagy c pontokban. Jeleztük már, hogy a c pont ritkán van a megengedett tartományban.

b/ Diszkrét fő- és mellékajtások esetében is először a folytonos megoldás optimumát keressük, majd

az előtolások és a fordulatszámok által meghatározott rácsnak a határvonalon és a tartományon belül fekvő szomszédos pontjában kiértékeljük a célfüggvényt /2.25b ábra/. Az a rácspontra lesz az optimális, ahol a célfüggvény értéke a legkedvezőbb.

c/ Amikor a forgácsolás megengedett tartománya valamilyen okból /pl. rezgések keletkezése miatt/ több részre esik szét /lásd például a 2.26. ábrát/, az optimálási módszer gyakorlatilag változatlanul alkalmazható.



Ekkor az optimálást a résztartományokra külön-külön kell elvégezni. Az egyes résztartományok optimális pontjaiban kiszámítandó a célfüggvény értéke, s ahol ez a legkisebb, ott lesz a globális optimum.

Ez az eljárás alkalmazható természetesen akkor is, amikor a $\log v$, $\log s$ sík tetszőleges tartományai-

ra kell valamilyen okból külön-külön elvégezni az optimálást. Ez az eset forog fenn például amikor a tartományok ugyan összefüggnek, de a matematikai modell, vagy ennek valamely paramétere az egyes tartományokra különböző.

Vizsgáljuk például azt az esetet, amikor bizonyos sebesség résztartományokban a Taylor-összefüggés jól leírja az éltartamot, azonban az összefüggés paraméterei a résztartományokra különbözőek /szakaszos Taylor-összefüggés/. Nyilvánvaló, hogy ekkor a változt módszer alkalmazható. Ebben az esetben a megengedett résztartományok összefüggők, de a különböző sebesség /fordulatszám/ tartományokhoz különböző Taylor-összefüggés paraméterek tartoznak. A szakaszos Taylor-összefüggés bonyolultabb esetekben is az éltartam jó közelítését adhatja. A pontosság fokozható a sebességtartományok felosztásának finomításával. Ez lényeges számítástechnikai nehézséget az optimáláskor nem okoz.

d/ Azokban az esetekben, amikor megfelelő megoldást ez sem nyújt, tehát az éltartam és a technológiai adatok összefüggése csak bonyolultabb módon jellemezhető, a következő megfontolások segíthetnek az optimáláskor.

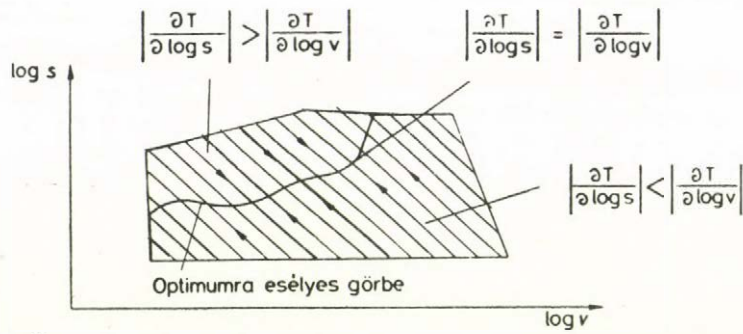
Ismeretes, hogy a forgácsolási sebesség változásának az éltartamra gyakorolt hatása általában jó-

val jelentősebb, mint az előtolásé. Az optimálás 1. tétele érvényben marad, függetlenül az éltartam összefüggés formájától egészen addig, ameddig ez a feltételezés igaz. Ekkor az optimális pont szintén a tartomány határán, nevezetesen az 1. tétel szerint meghatározható optimumesélyes határvonalon található. Ha a határoló szakaszok lokális szélsőérték pontjai egyszerűen meghatározhatók, akkor a 2.2.2.1.1. pontban leirthoz hasonló algoritmus alkalmazható, azzal a különbséggel, hogy a 2. tétel adta egyszerűsítés lehetősége hiányzik. Az optimumesélyes határvonalon való közvetlen keresés sem látszik számítástechnikailag különösebben nehéz feladatnak.

e/ Azokban a ritka esetekben, amikor a forgácsolás megengedett tartományában találhatók olyan pontok, amelyekben az előtolás hatása az éltartamra nagyobb, mint a forgácsolási sebességé, a helyzet megváltozik. Az optimumra esélyes pontok halmazának -45° -os egyenesek mentén való keresése ekkor is helyes ut. Azonban ebben az esetben, mint azt a 2.27. ábra mutatja, az optimumhely a

$$\left| \frac{\partial T}{\partial \log s} \right| = \left| \frac{\partial T}{\partial \log v} \right|$$

feltételnek eleget tevő pontokban, tehát a tartomány belsejében is lehet. A



2.27. ábra. A keresési tartomány különleges éltartamösszefüggések esetében

$$\left| \frac{\partial T}{\partial \log s} \right| > \left| \frac{\partial T}{\partial \log v} \right|$$

értékkel jellemzett helyek kizárásával a keresési tartományt úgy szűkíthetjük be, hogy az optimumra esélyes - korábban a tartományon belül fekvő - pontok a határvonalakra kerülnek, így a feladat a d/ esetre vezethető vissza. Az optimális technológiai adatok meghatározhatók az erre esélyes pontok halmazán alkalmazott kereséssel. A keresés módja függ az éltartam összefüggés formájától.

f/ Előfordulhatnak bonyolultabb alaku feltétel-rendszerek és éltartam összefüggések, amelyek nem teszik lehetővé a vázoltak alkalmazását. Ezek, véleményünk szerint, a gyakorlati esetek kis töredékét alkotják. Ilyen esetekben az optimalás megoldható szabványos matematikai programozási módszerekkel, amelyek számításigényessége rendszerint jelentős.

2.3. Magasabb szintű optimálási módszerek

Másodlagos optimálás

A 2.2. pontban a műveletelemek során alkalmazandó optimális előtolás és forgácsoló sebesség értékek meghatározásának problémáját izoláltan, a környezetből kiszakítva fogalmaztuk meg. A pusztán műveletelem állt szemben az MKGS rendszerrel, annak tekintetbe vétele nélkül, hogy a műveletelemek megmunkálása milyenségének tulajdonképpen önállóan semmiféle jelentősége sincs.

A műveletelemek halmaza alkatrészeket alakít ki és a műveletelemek optimálásakor kapott fiktív jellemzők az alkatrészre vonatkozó összesítésükben kapnak értelmet és gyakorlati jelentőséget. Míg a műveletelem egységnyi hosszára vonatkozó költség, megmunkálási idő, szerszám elhasználódás csak nagyon távoli háttér információ gyanánt szolgálhat, az alkatrészek forgácsolási költsége, megmunkálási ideje, az egyes szerszámok kopása az egész termelési folyamatot és ennek tervezését közvetlenül befolyásoló tényezők.

A következőkben megfogalmazzuk az alkatrészekre vonatkozó optimálási problémát. Ez a probléma az alkatrészt kialakító műveletelemek forgácsolási ada-

tainak olyan meghatározása, hogy az alkatrész megmunkálásra megfogalmazott követelményeket elégítsen ki.

Mivel a megoldáskor nem nullából indulunk ki, hiszen a műveletelemek optimálásakor kapott eredmények kiindulási alapul szolgálnak, a feladatot másodlagos optimálási problémának nevezzük.

2.3.1. A másodlagos optimálás matematikai modellje

Vizsgáljuk egy munkadarab megmunkálását, amelyet több különböző szerszámmal munkálnak meg. Legyen a szerszámok száma R . Mindegyik szerszám különböző számú műveletben vesz részt. Az egyes megmunkált hosszak, átmérők és fogásmélységek ismertek. Határozzuk meg a műveletek előtolásainak és forgácsoló sebességeinek optimális értékeit.

Legyen tehát az egyes szerszámok sorszáma

$$K = 1, 2, 3, \dots, R.$$

Legyen az egyes szerszámokkal megvalósítandó műveletelemek száma megfelelően

$$N_1, N_2, N_3, \dots, N_R.$$

Nyilvánvalóan teljesen közömbös, hogy az összesen

$$N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_R = N$$

számu műveletelemet milyen sorrendben tekintjük végig. Jellemezzék az i -edik műveletelemre érvényes matematikai modellt az

$$E_j \min \leq a_i^{x_j} s_i^{y_j} v_i^{z_j} \leq E_j \max$$

$$/j = 1, 2, \dots, h/,$$

$$T_i^m = \frac{C_{vi}}{s_i^{y_{vi}} v_i^{x_{vi}} a_i^{z_{vi}}}, \quad /2.40/$$

$$K_i = \frac{L_i C_M}{s_i n_i} \left(1 + \frac{C_{Ti}}{T_i} \right) + \Delta K_i \quad /2.41/$$

összefüggések, ahol $i = 1, 2, 3, \dots, N$.

ΔK_i a visszafutással és egyéb veszteségekkel kapcsolatos költségeket jellemzi.

Minden egyes műveletelemre ismeretesek a megfelelő L_i , d_i , a_i hosszak, átmérők és fogásmélységek.

A korábban ismertetett módszerrel az egyes műveletelemekre meghatározhatók az optimális előtolás és a forgácsolási sebesség /fordulatszám/ értékek.

Ezek alapján könnyen meghatározható a munkadarab megmunkálásának összköltsége és összideje, csupán összegezni kell valamennyi műveletelemre ezeket a mennyiségeket. Hasonló módon valamennyi szerszámra meghatározható kopásuk mértéke, csak összegezni kell szerszámonként a műveletelemekhez tartozó rész-
kopásokat. /A kopások összegzésének lehetőségére vonatkozóan vannak szakirodalmi utalások. Amikor ez - a javasolt módszer szempontjából igen kényelmes - feltételezés nem teljesül, a módszer alapjai ingataggá válnak. Nem különben a determinisztikus módszerrel való optimálásnak általában./

Jelöljük az összköltséget, az időt és a kopásokat rendre K_{Σ} , t_{Σ} és $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_R$ jelekkel.

A fentiek szerint

$$K_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N K_i = \sum_{i=1}^N \frac{L_i C_M}{s_i n_i} \left(1 + \frac{C_{Ti}}{T_i} \right) + \Delta K_i, \quad /2.42/$$

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N t_i = \sum_{i=1}^N \frac{L_i}{s_i n_i} + \Delta t_i \quad /2.43/$$

/ Δt_i az i -edik műveletelemhez tartozó veszteségidő-

ket jellemzi/

$$\Delta_k = \sum_{j \in I_k} \frac{S_k}{S_{k-1}} \quad \frac{t_j}{T_j} = \sum_{j \in I_k} \frac{L_j}{s_j n_j T_j} \quad /2.44/$$

$$k = 1, 2, \dots, R.$$

/Az összegzés természetesen csak azokra a művelet-
elemekre terjed ki, amelyekben a k-adik szerszám for-
gácsol. Az első műveletelem sorszámát S_{k-1} -gyel, az
utolsóét S_k -val jelöltük. Ugyanezt az összegzést fe-
jezi ki a $j \in I_k$ jelölés./

A műveletelemek optimális technológiai adatai-
nak meghatározását a minimális költség kritériuma
szerint és ezek alapján a munkadarabra összesített
költség, megmunkálási idő és szerszámkopások kiér-
tékelését elsődleges optimálásnak nevezzük. - Ezzel
párhuzamosan egyszerűen kiértékelhetők a feltétel-
rendszerek által megszabott, minimálisan és maximá-
lisan lehetséges értékek ugyanezekre a mennyiségekre.

A minimális megmunkálási időhöz maximális szer-
számkopások tartoznak és fordítva, minimális szerszám-
kopásokhoz valamilyen meglehetősen nagy idő.

Vezessük be ezekre a mennyiségekre a következő
jelöléseket:

t_{Σ}^{\min} minimális idő,

Δ_k^{\max} maximális kopás, $k = 1, 2, \dots, R$,

ekkor a megmunkálási költségeket a

K_{Σ}^a jelöli.

A második esetben

Δ_k^{\min} minimális kopás,

t_{Σ}^{\max} a minimális kopáshoz tartozó idő,

és a költségeket

K_{Σ}^b jelöli.

Nyilvánvalóan

$$t_{\Sigma}^{\min} \leq t_{\Sigma} \leq t_{\Sigma}^{\max},$$

$$\Delta_k^{\min} \leq \Delta_k \leq \Delta_k^{\max},$$

$$K_{\Sigma}^a \geq K_{\Sigma}; K_{\Sigma}^b \geq K_{\Sigma}.$$

A fenti adatok kiindulásul szolgálnak a termelési programok összeállításához, termelésirányítási döntésekhez, intézkedésekhez stb.

Ezek a feladatok elvileg magasabb szintű optimalizációs problémák. Megoldásukkor kiderülhet, hogy az alacsonyabb szinten kapott eredmények nem kedvezőek. Így például kiderülhet, hogy a t_{Σ} idő valamilyen termelésirányítási szempontból /pl. szállítási határidő/ túl nagy. Bizonyos esetekben bekövetkezhet, hogy a kiinduló adatokkal összeállított programok szerint egyes gépek időnként munka nélkül maradnak.

Az első esetben bizonyos műveletek intenzitását fokozni kell. A második esetben a rendelkezésre álló idő teljes kihasználásával lényeges szerszámmegtakarítás érhető el. Általában a következő követelmények fogalmazhatók meg:

a/ Bizonyos munkadarabokra a megmunkálási idő túl nagy. Ekkor a következő korlátozás bevezetése szükséges:

$$t_{\Sigma} \leq t_m, \quad /2.45/$$

ahol t_m a megadott idő, amelyet betartani szükséges. Nyilvánvaló, hogy ez a követelmény nem lehet szigorubb, mint az elérhető legkisebb megmunkálási idő, vagyis

$$t_{\Sigma}^{\min} \leq t_m.$$

b/ Amikor bizonyos szerszámokra a kopás túl nagy értékűnek bizonyul, a bevezetendő új korlátozásoknak

$$\Delta_k \leq \Delta_{km} \quad /2.46/$$

alakúnak kell lenniük, ahol a Δ_{km} megadott kopásértékekre nyilvánvaló, hogy nem lehetnek kisebbek, mint a lehetséges legkisebb kopások, vagyis

$$\Delta_{km} \geq \Delta_k^{\min}.$$

c/ Több idő áll rendelkezésre a megmunkálásra, mint t_Σ , vagyis a gép nincs leterhelve teljes kapacitásig. Ekkor a következő korlátozást célszerű bevezetni:

$$t_\Sigma \geq t_r, \quad /2.47/$$

ahol t_r megadott idő.

A korlátozások kombinálása is lehetséges. Pl. előfordulhat olyan eset, amikor a megmunkálási időt csökkenteni kell úgy, hogy bizonyos szerszámok kopása is csökkenjen. Ez persze csak a többi szerszám kopásának növekedése árán lehetséges.

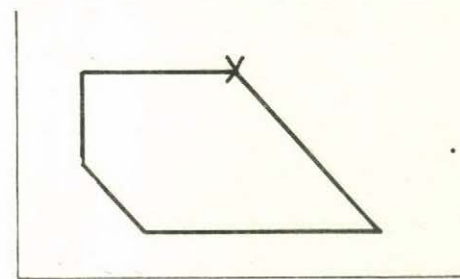
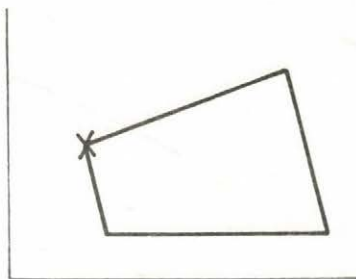
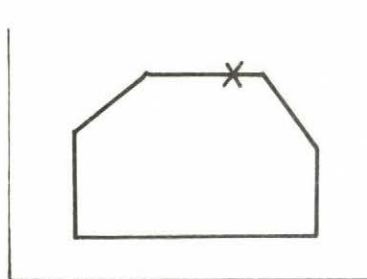
Az elsődleges optimáláskor a műveletelemek adatainak optimálása külön-külön elvégezhető. Ez nem más, mint a 2.2. pontban vázolt módszer sorozatos alkalmazása. A minimális megmunkálási idő és a minimális szerszámkopást eredményező forgácsolási adatok könnyen meghatározható kiegészítő információk.

Nyilvánvaló, hogy a műveletelemekre minimális megmunkálási költséget eredményező forgácsolási adatok az egész munkadarabra is a minimális megmunkálási költséget eredményezik.

A /2.45/, /2.46/ vagy /2.47/ korlátozások bevezetése azonban gyökeresen megváltoztatja a helyzetet. Ezekben az egyes műveletelemek technológiai adatainak hatása együttesen jelentkezik. Az optimálási probléma dimenziója sokszorosra növekszik. Nyilvánvalóan a cél az új korlátozások tekintetbe vétele mellett továbbra is a /2.42/ költségfüggvény minimálása.

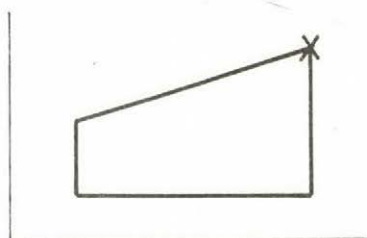
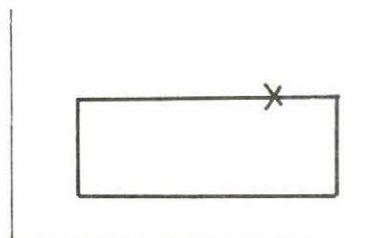
A fentiekben megfogalmaztuk a másodlagos optimálási problémát. Szemléletessé tételéhez vizsgáljuk a 2.28. ábrát. Ezen bemutatjuk, hogy az elsődleges optimálás során mindegyik szerszámra, minden megengedett tartományra meghatároztuk a minimális forgácsolási költséget eredményező pontot. Azonban ezek a pontok nem elégítik ki a munkadarab szintjén támasztott új követelményeket.

1. szerszám



.....

2. szerszám



.....

i. szerszám



.....

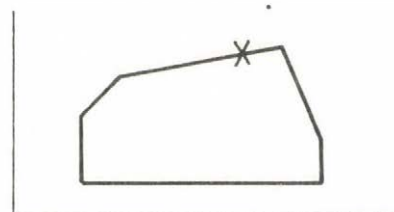
R szerszám

N művelet elem

x - optimális pontok

R. szerszám

⋮



.....

2.28. ábra. A másodlagos optimálás problémája

A kérdés az, hogy hogyan jelentkeznek az új követelmények az egyes műveletelemek szintjén. Ha a követelmények az elsődleges optimálás által kimutatott határok között vannak, akkor megvalósíthatóak. Visszatérve a 2.28. ábra példájához, az azon bejelölt optimális pontokat kell összehangoltan úgy eltolni /természetesen a megengedett tartományokat tekintetbe véve/, hogy ez összzhatásában kielégítse a követelményeket. A feladat általában nagyon sokféleképpen oldható meg, mi viszont azt a megoldást keressük, amely a minimális megmunkálási költséget eredményezi.

2.3.2. Másodlagos optimálási módszer

A vázolt feladat nem-lineáris programozási probléma. Ezek közül is az utóbbi időben különös figyelmet élvező geometriai programozási probléma.

A feladatok méretei általában nem olyan nagyok, hogy reménytelen lenne a nem-lineáris vagy speciálisan a geometriai programozás módszereinek alkalmazása.

A probléma különleges jellege miatt szerencsére azonban sokkal egyszerűbb ut választható, amely mint az alábbiakból kiderül, fontos elvi eredményre is vezet.

Alkalmazzuk a másodlagos optimálási probléma megoldására a feltételes szélsőérték keresés Lagrange-féle módszerét.

Először vizsgáljuk azt az esetet, amikor a munkálási időre vezetünk be korlátozást.

Tehát /2.45/ szerint

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N t_i \leq t_m$$

Vezessük be /2.66/ helyett a következő célfüggvényt:

$$L = K_{\Sigma} + \lambda_0(t_{\Sigma} - t_m), \quad /2.48/$$

ahol $\lambda_0 = \text{konst.}$

Nyilvánvaló, hogy minden egyes műveletelem esetében a másodlagosan optimális pont is csak az optimumesélyes határvonalon lehet, hiszen a megengedett tartomány belsejéből a -45° -os egyenesek mentén mindig eljutunk egy olyan határpontba, amely azonos forgácsolási idő mellett kisebb költséget eredményez.

Igy a /2.48/ célfüggvény viselkedése csak az optimumesélyes határvonalakon vizsgálendő.

$$A \quad \frac{\partial L}{\partial T_i} = 0 \text{ feltételt az optimumesélyes határ-}$$

vonalra alkalmazva azt kapjuk /lásd a 2.3. Függelék/, hogy az egyes műveletelemek optimális pontjaihoz tartozó éltartamok értéke nem az elsődleges optimáláskor kapott

$$T_{szj} = \frac{1 + y_{vi}N_j - (N_j + 1)m_i}{m_i(N_j + 1)}$$

lesz, hanem

$$T_i(\lambda_0) = \frac{1 + y_{vi}N_j - (N_j + 1)m_i}{m_i(N_j + 1)(1 + \lambda_0)} \quad C_{Ti} = \frac{T_{szj}}{1 + \lambda_0},$$

/2.49/

ahol T_{szj} az i műveletelem j korlátozásának szélső-
 éeték pontjához tartozó éltartam.

A λ_0 Lagrange-szorzó értékének növekedése a mű-
 veletelemek során a megmunkálás intenzitását fokoz-
 za, az éltartamot csökkenti.

$$A \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda_0} = 0 \text{ feltétel a}$$

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N t_i = t_m \quad /2.50/$$

triviális eredményre vezet. A $T_i(\lambda_0)$ érték az opti-
 mumesélyes hatávonalon meghatározza az optimális elő-
 tolás és forgácsolási sebesség értékeket. Ezeknek

olyanoknak kell lenniük, hogy kielégítsék a /2.50/ feltételt.

Ez a feltétel meghatározza a λ_0 értékét, amelynek hatása azután a /2.49/ összefüggés szerint a technológiai adatokon tükröződik.

Ez tehát az a mechanizmus, amelyen keresztül a magasabb rendű követelmények tükröződhetnek a műveletelemek technológiai adataiban.

A fentiekhez hasonló módon kezelhető az az eset, amikor az egyes szerszámok kopására vannak megadva korlátozások.

Legyen

$$\Delta_k \leq \Delta_{km}.$$

Ekkor, az új célfüggvény bevezetésével, a $\frac{\partial L}{\partial T_i} = 0$ összefüggésből levezethető, hogy

$$T_i(\lambda_k) = T_{szj}(1 + \lambda_k). \quad /2.51/$$

A λ_k szorzónak a

$$\Delta_k = \Delta_{km}$$

összefüggést kell kielégítenie. A λ_k növekedése a forgácsolás intenzitását és így a szerszámkopást csökkenti.

A másodlagos optimálás módszere pontosan azonos az előző esetben alkalmazottal. Hogy mi történik a műveletelemek elsődleges optimáláskor kapott adataival a másodlagos optimáláskor, azt a 2.29. ábra szemlélteti.

Rendkívül érdekes eset az, amikor egyidejűleg akarjuk a megmunkálás idejét és bizonyos szerszámok kopását csökkenteni. Ez nyilvánvalóan csak a további szerszámok kopásának a rovására történhet és csak akkor, ha a követelmények egymással nem ellentmondóak. A probléma rendkívül egyszerűen oldható meg oly módon, hogy szétválasztjuk a műveletelemeket aszerint, hogy a szerszámok kopását korlátozni akarjuk vagy pedig nem.

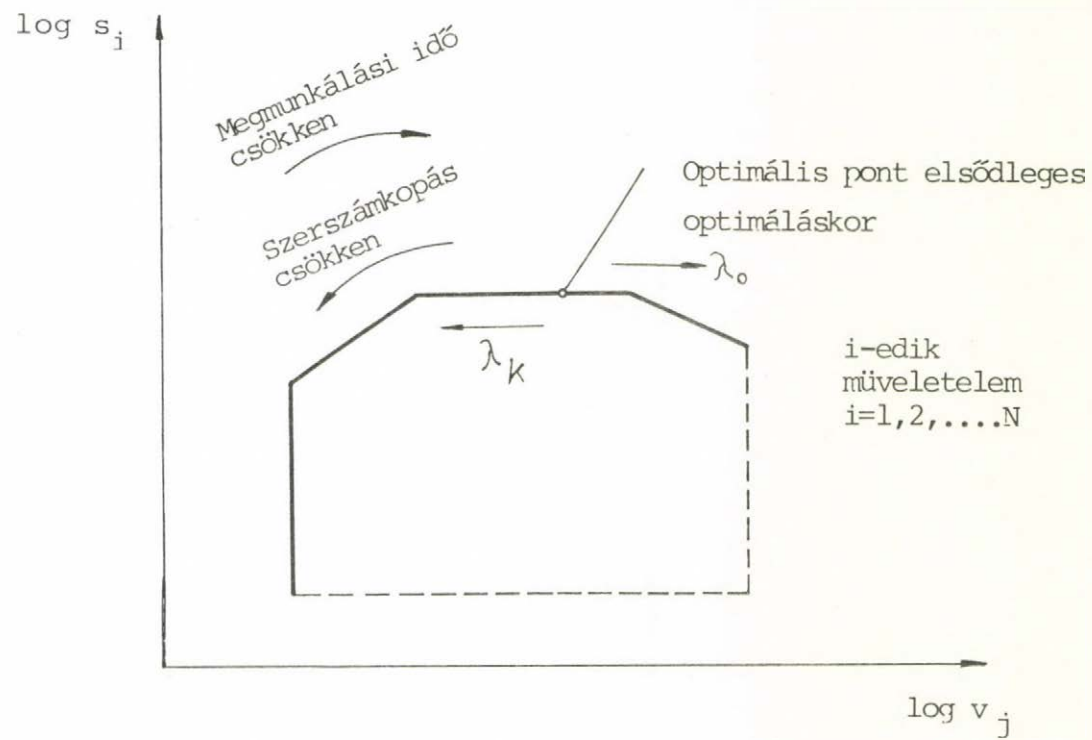
A megkívánt kopások előbb leirt módon való beállítása után a fennmaradó műveletelemeknek a - szintén az előbb leirt módon való - változtatásával érhetjük el a megmunkálási idő kívánt értékét.

Bizonyítható, hogy ez a módszer a másodlagos optimálási probléma szabatos kielégítését adja a következő egyenletrendszer megoldásával

$$T_{ik} = T_{szj} \frac{1 + \lambda_k}{1 + \lambda_0}$$

$$\sum_{i=0}^N C_L C_5 T_{ik}^{\beta_j} = t_m$$

/2.75/



2.29. ábra. A másodlagos optimalálás szemléltetése

$$\sum_{i=S_{k-1}}^{S_k} C_L C_5^T \beta_j^{-1} = \Delta_{km}.$$

Az ik index azt az i -edik műveletelemet jelenti, amelyet a k -edik szerszámmal végzünk.

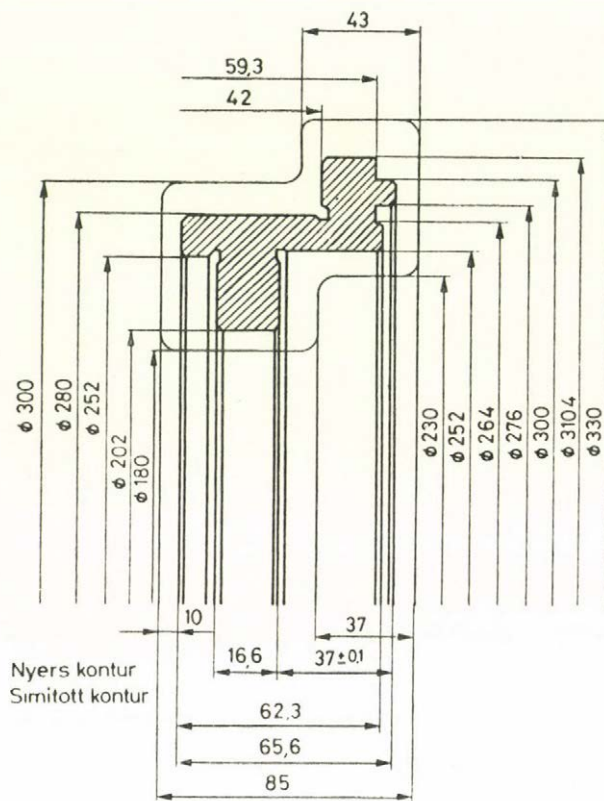
A β_j kitevő és a C_L , C_5 együtthatók a 2.3. Függelékben értelmezve vannak. A /2.52/ egyenletrendszer numerikusan könnyen megoldható, s ez egyben a másodlagos optimálás megoldását is jelenti.

A másodlagos optimálás eredményei fontos információkat szolgáltatnak a munkadarab megmunkálási jellemzőinek kiértékeléséhez. Már az elsődleges optimálás kimutatja az optimális megmunkálási költségen, időn és szerszámkopáson kívül, hogy egyáltalán milyen határok között változhatnak ezek a jellemzők.

A másodlagos optimálásból az is kiderül, hogy a magasabb szintű követelményeknek mi az ára. Ez bizonyos típusú érzékenységi vizsgálatokat tesz lehetővé, amennyiben kimutatható, hogy milyen módon reagálnak a megmunkálási költségek a kiegészítő korlátozásokra, ami jelentős segítséget nyújthat a termelésirányítási szakembereknek.

Azzal a kérdéssel, hogy milyen szerepet kap a másodlagos optimálás az alkatrészgyártás tervezésében és különösen a termelésirányításban, a későbbiekben részletesen foglalkozunk.

Az alábbiakban egy példát mutatunk be a másodlagos optimalizációs módszer szemléltetésére.



2.30. ábra. Megmunkálási példa

Példa:

Vizsgáljuk a 2.30. ábrán látható tárcsát. A C45 anyagból készült tárcsa nagyoló megmunkálását kétféle oldalazó, egy belső és egy külső hosszesztergáló szerszám végzi. A megmunkáló szerszám gép főorsó meghajtásának teljesítménye 21 kW. A megmunkálás műveletterveit a FORTAP számítógépes NC-programozási rendszer szolgáltatta. Ugyanez a rendszer szolgáltatta

ta az optimáló program számára a feltételrendszeret is. A műveletelemekre vonatkozó adatokat - amelyeket a számítógépprogram részletesen kiír - nem részletezzük. A 2.7. táblázatban megadjuk az elsődleges optimálás eredményeit. A táblázat adataiból látható, hogy mód van a megmunkálási idő csökkentésére.

2.7. táblázat

Elsődleges optimálással kapott adatok tárcsa megmunkálásakor

Idő	min	Költség	Ft
Optimális idő	6,97	Optimális költség	17,14
Maximális idő	161,12	Hozzá tartozó költség	322,23
Minimális idő	3,87	Hozzá tartozó költség	447,30

a) Megmunkálási idők és költségek

b) Szerszám-elhasználódás

	Optimális %	Minimális %	Maximális %
1. Oldalazó szerszám	2,12	0,00020	5,1
2. Oldalazó szerszám	2,28	0,00009	67,1
3. Belső hosszsztergáló szerszám	4,54	0,00041	247,3
4. Külső hosszsztergáló szerszám	3,33	0,00090	1371,0

Legyen a megmunkálási időre vonatkozó feltételünk

$$t_m = 5 \text{ min. Vagyis új korlátozó feltételünk}$$

$$t_{\Sigma} \leq 5 \text{ min.}$$

A másodlagos optimálás eredményeit a 2.8. táblázat „a” oszlopa tartalmazza. A megmunkálási idő csökkenté-

2.8. táblázat

Másodlagos optimalálás

	Másodlagos optimalálási feltétel			
	$t \leq 5 \text{ min}$	$\Delta \leq 2\%$	$\Delta \leq 1\%$	$\Delta \leq 0,2\%$
Optimális idő	4,99 min	7,80 min	3,18 min	13,65 min
Optimális költség	25,46 Ft	17,69 Ft	19,40 Ft	27,51 Ft
Szerszám-elhasználódás, %				
1. oldószó szerszám	5,16%	2,0000%	1,0000%	0,200%
2. oldószó szerszám	13,81%	2,0000%	1,0000%	0,200%
Belső hosszszertgáló szerszám	27,48%	2,0000%	1,0000%	0,200%
Külső hosszszertgáló szerszám	12,83%	2,0000%	1,0000%	0,200%
	a	b	c	d

sének az az ára, hogy a költség 17,14 Ft-ról 25,46 Ft-ra nő, de ennél is jelentősebb, hogy nagymértékben növekszenek a szerszámkopások, amelyeket az éltartamhoz viszonyított elhasználódás százalékában fejezünk ki. Az elsődleges optimaláláskor kapott szerszámkopások nem egyenlőek. Tűzzük ki most célul, hogy a szerszámkopások valamennyi szerszámra legyenek azonosak, s ne haladják meg az éltartamhoz tartozó érték 2%-át, azaz legyen $\Delta \leq 2\%$, majd később rendre legyen $\Delta \leq 1\%$ és $\Delta \leq 0,2\%$.

Az eredményeket a 2.8. táblázat b, c és d oszlopa mutatja. Látható, hogy a költségnövekedés viszonylag mérsékelt, viszont a megmunkálási idő erőteljesen növekszik.

Természetesen az optimaláláskor, mint említettük, a számítógépprogram meghatározta valamennyi művelet-

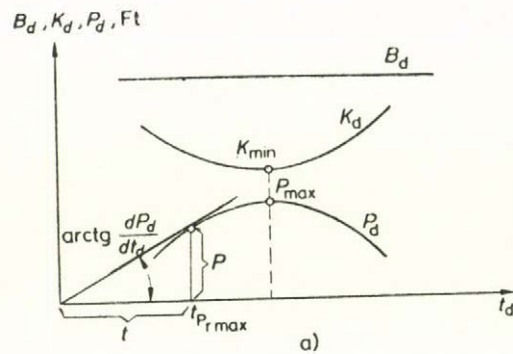
elem, előtolás és sebesség értékeit, idő, költség, szerszámkopás jellemzőit. A felesleges részletek elkerülése végett a táblázatokba csak az összegzett mennyiségeket foglaltuk. Gyakorlati esetekben a részletek is érdeklődésre érdemesek lehetnek.

2.3.3. Másodlagos optimálás diszkrétén változó forgácsolási sebességek esetében.

Amikor a forgácsoló sebességek csak megadott értékeket vehetnek fel, tehát a szerszámgépnek nincs fokozatmentes főorsóhajtása, a másodlagos optimálási módszer alábbi változata javasolható. Először elvégezzük a másodlagos optimálást fokozatmentes főhajtást feltételezve.

Az így kapott optimális pontok környezetében a korábban vázoltak alapján /lásd 2.25. ábrát/ megkeressük a legkedvezőbb diszkrét pontot. Ily módon egy alapmegoldást kapunk. Ha ez kielégíti a megmunkálási időre és a kopásra megadott kiegészítő feltételeket, esetleg tartalékkal is, akkor a kapott adatok tekinthetők a másodlagos optimálás eredményének.

Amikor a feltételek nem teljesülnek, a következő eljárás alkalmazható. Mindegyik műveletelemre,



2.31. ábra. A legmagasabb nyereségráta helye (a);

hatjuk. A nyereségráta maximuma abban a pontban van, ahol az origóból húzott egyenes érinti a nyereség-görbét. Valóban a nyereség és idő hányadosa minden más pontban csak kisebb lehet.

Vizsgáljuk meg közelebbről is a maximális nyereségráta problémáját. A /2.54/ és a /2.55/ kifejezést a teljes alkatrészre irtuk fel. Mind a költség, mind a darabidő csak mint a műveletelemek /sőt a fogások/ részadatainak összege írható fel, azaz

$$K_d = \sum_{i=1}^N K_i \quad \text{és}$$

$$t_d = \sum_{i=1}^N t_i.$$

Ha ezek után felírjuk a nyereségrátát a

$$P_r = \frac{B_d - \sum K_i}{\sum t_i}$$

alakban, akkor azonnal látható, hogy a maximális nyereségrátához tartozó forgácsolási paraméterek meghatározása nem lehetséges az elsődleges optimálás fázisában. A problémát az okozza, hogy a bevétel a legjobb esetben is a teljes alkatrészre vonatkozik s nem ismert, hogyan osztandó fel az egyes műveletelemek /fogások/ között. Ismernünk kellene az árbevételt is

$$B_d = \sum_{i=1}^N b_i$$

összegként, hogy rendre megoldhassuk a

$$\frac{p_i}{t_i} = p_{ri} = \frac{b_i - K_i}{t_i} \rightarrow \max. \quad /2.56/$$

feladatot, amely műveletek eredményeként eljuthatnánk a

$$P_r \max = \sum_{i=1}^N p_{ri} \max = \sum_{i=1}^N \max \frac{b_i - K_i}{t_i} \quad /2.57/$$

eredményig.

A legnagyobb nyereségre való optimálás eddig

$$P_d = B_d - K_d \quad Ft$$

s mivel a K_d önköltség függ a technológiai adatoktól, azaz a gyártási időtől

$$P_d(t_d) = B_d - K_d(t_d). \quad /2.53/$$

Jogosan feltételezhető, hogy a gyártmány azonos minőségre és azonos értékesítési feltételek mellett az árbevétel független a gyártási időtől, ezért bizonyítás nélkül is belátható, hogy az alkatrészre értelmezett nyereség akkor maximális, amikor az önköltség a legkisebb. Ez a feladat tehát azonos a legkisebb önköltséghez tartozó forgácsolási paraméterek meghatározásának problémájával. A kérdésre később még visszatérünk.

Más eredményre jutunk, ha a nyereséget a gyártóberendezés - vagy a gépkezelő munkaidejének - legjobb hasznosítása szemszögéből vizsgáljuk. Ebben az esetben a feladat úgy fogalmazható meg, hogy az időegységre jutó nyereség, azaz a P_r nyereségráta legyen maximális, tehát a célfüggvény

$$P_r = \frac{P_d}{t_d} \rightarrow \max. \quad Ft/min \quad /2.54/$$

alakot ölt. A célfüggvény helyes volta könnyen belátható, hiszen ilyen feltétel mellett lesz a legnagyobb a berendezés üzemeltetéséből származó halmozott nyereségtömeg.

A korábbiakhoz hasonló a nyereségráta optimumának feltétele a

$$\frac{dP_r}{dt_d} = 0$$

egyenlőség. Alkalmazzuk az ismert deriválási szabályt /2.54/ összefüggésre:

$$\frac{dP_r}{dt_d} = \frac{\frac{dP_d}{dt_d} t_d - P_d}{t_d^2} = \frac{1}{t_d} \left(\frac{dP_d}{dt_d} - \frac{P_d}{t_d} \right) = 0.$$

A zárójeles kifejezés második tagja nem más, mint a P_r nyereségráta, s nyilvánvaló, hogy a differenciáhányados értéke csak akkor lehet zérus, ha a zárójeles kifejezés értéke zérus. Tehát a nyereségráta maximumát a

$$\frac{dP_d}{dt_d} = P_r = \frac{P_d}{t_d} \quad /2.55/$$

feltétel teljesülésekor kapjuk [2.15, 2.16]. A feltétel geometriai interpretációját a 2.31. ábrán lát-

amelynek szerszámára kopáskorlátozás van megadva, egy-egy fokozattal változtatjuk /csökkentjük/ a főorsó fordulatszámot. Képezzük a kopáscsökkenés és a megmunkálási költségváltozás hányadosát. Annál a műveletelemnél, ahol ez a legnagyobb, megváltoztatjuk a fordulatszámot.

Ennek az az oka, hogy ekkor érjük el a kopásnak az egységnyi költségnövekedésre jutó legnagyobb csökkenését.

Ezt az eljárást addig folytatjuk, ameddig a megadott kopásokat el nem értük.

A megmunkálási időre megadott korlátozások esetében hasonló eljárás alkalmazható. Ekkor a műveletelemekre a megmunkálási időváltozások és költségváltozások hányadosa számítandó ki és a hajtásfokozatok változtatásai az ezekre vonatkozóan legkedvezőbb műveletelemekre végzendők el sorozatosan, a követelmények teljesüléséig.

2.3.4. Optimálás a legnagyobb nyereségre

Az optimálás helyéről, szerepéről, alkalmazásáról termelési rendszerekben, ezen belül a másodlagos optimálásról, a későbbiekben részletes fejtegetéseket közlünk. A jelen pontban egy olyan problé-

mával foglalkozunk, amelyet a szakirodalomban megfogalmaztak, de csak műveletelemekre. Ez a probléma a legnagyobb nyereségre való optimálás. A műveletelemekre csak mesterkélten megfogalmazható feladat értelmet és hatékony megoldási lehetőséget kap a másodlagos optimálással, mint ezt az alábbiakban bemutatjuk.

Az eddigiekben a forgácsolási paraméterek optimalítását a munkadarab szemszögéből vizsgáltuk, azaz azt a gazdasági célt fogalmaztuk meg, hogy valamely alkatrész a lehetséges legrövidebb idő alatt vagy a legkisebb önköltséggel készüljön el. Alapszintű optimálás esetén egy-egy elemi fogásra vagy műveletelemre irtuk elő, hogy a lehető legolcsóbban vagy leggyorsabban valósuljon meg.

A technológiai adatok optimálása vizsgálható a nyereség szemszögéből is [2.14], sőt maga a nyereség is több módon értelmezhető. Megfogalmazható az optimálási feladat úgy, hogy az egy-egy alkatrészre eső nyereség legyen maximális. Jelöljük B_d -vel az alkatrész értékesítéséből származó árbevétel anyagár és a nem gépi költségek levonása után maradó részét, K_d -vel az alkatrész önköltségét, t_d -vel az alkatrész darabidejét, P_d -vel pedig a nyereséget. Nyilvánvaló, hogy

kidolgozott módszerei az árbevétel ilyen felosztási lehetőségét kellett hogy feltételezzék.

Az árbevétel ilyen felosztása természetesen lehetetlen. Azonban ez nem is szükséges, hiszen a 2.3.2. szakaszban ismertetett másodlagos optimálási módszer éppen arra szolgál, hogy az egész munkadarabra vonatkozó feltételek kielégíthetők legyenek.

Vizsgáljuk meg, hogyan alkalmazható ez a módszer a legnagyobb nyereségre való optimáláskor.

A /2.55/összefüggés olyan feltételt ír elő, amelyet az optimális megmunkálási adatoknak ki kell elégíteniük, azonban nem ad módot ezeknek az adatoknak a kiszámítására.

A magasabb rendű optimálási módszer ismertetésekor vázoltuk, hogy adott munkadarab esetében mód van olyan technológiai adatok meghatározására is, amelyek mellett a megmunkálási idő különbözik a minimális megmunkálási költséghez tartozó időtől. Ez az idő t_{Σ}^{\max} és t_{Σ}^{\min} határok között változhat. Ezek közül t_{Σ}^{\min} a lehetséges legkisebb megmunkálási idő, amelynek elérése sokszor optimálási kritériumként is szolgál.

Fontos megjegyezni, hogy minden megadott $\Sigma t_i = t_{\Sigma} = t_m$ megmunkálási időhöz egy és csakis egy pontosan meghatározott technológiai adathalmaz tartozik,

amelyet az jellemez, hogy az adott megmunkálási idő mellett a megmunkálási költség minimális. Ekkor $\Sigma K_i = K_\Sigma = K_\Sigma(t_m)$ és ez az érték nagyobb, mint a minimális megmunkálási költség.

Vizsgáljuk meg, hogyan alkalmazhatók a fentiek a nyereségráta optimalálása szempontjából. A minimális költséghez tartozó nyereségráta értéke

$$P_r^O = \frac{B_d - K_\Sigma^{\text{opt}}}{t_\Sigma^{\text{opt}}}.$$

Nyilvánvaló, hogy a $t_\Sigma^{\text{opt}} < t_\Sigma < t_\Sigma^{\text{max}}$ határok között a nyereségráta értéke $P_r < P_r^O$, hiszen $K_\Sigma > K_\Sigma^{\text{opt}}$ és emellett még $t_\Sigma > t_\Sigma^{\text{opt}}$.

A $t_\Sigma^{\text{min}} \leq t_\Sigma \leq t_\Sigma^{\text{opt}}$ tartományban, mint ezt a /2.55/ összefüggéssel kapcsolatban kifejtettek is hangsúlyozzák, keresendők a maximális nyereségrátát eredményező technológiai adatok.

A maximális nyereségrátát és a hozzá tartozó technológiai adatokat iterációs vagy közvetlen kereső algoritmussal lehet meghatározni. Először megvizsgáljuk, hogy nem áll-e fenn a $t_\Sigma^{\text{min}} = t_\Sigma^{\text{opt}}$ feltétel, mivel az előzőek alapján ekkor a minimális önköltséget adó technológiai adatok intenzitása nem növelhető tovább, és így a maximális nyereségrátát is ezek az adatok biztosítják.

/Ebben az esetben a

$$\frac{dP_d}{dt_d} = P_r$$

feltétel csak a forgácsolás megengedett tartományán kívül teljesül./

A továbbiakban közvetlen kereső módszer is alkalmazható. Ennek módja a következő: a $t_{\Sigma}^{\min} < t_{\Sigma} < t_{\Sigma}^{\text{opt}}$ tartomány megfelelő módon való felosztásával a kapott $t_{\Sigma 1}, t_{\Sigma 2}, \dots, t_{\Sigma M}$ értékeknél a magasabb rendű optimálási módszerrel meghatározzuk az egyes megmunkálási időhöz tartozó

$K_{\Sigma 1}, K_{\Sigma 2}, \dots, K_{\Sigma j}, \dots, K_{\Sigma M}$ költségértékeket.

A

$$P_{rj} = \frac{B_d - K_{\Sigma j}}{t_{\Sigma j}}$$
$$j = 1, 2, 3, \dots, M$$

képlet szerint kiszámítjuk a nyereségrátákat. Az optimális változatot a P_{rj} értékek közül a legnagyobb kiválasztásával kapjuk meg. Egyben az ehhez tartozó másodlagos optimálás eredményei szolgáltatják valamennyi műveletelem technológiai adatait és a megmunkálás egyéb jellemzőit.

A közvetlen kereső eljárás sok, gyakran felesleges számítást igényel. Ennél gyorsabban eredményre vezető kereső módszerek is vannak, pl. egy módosított gradiens módszer, amelynek segítségével a $(t_{\Sigma}^{\min}, t_{\Sigma}^{\text{opt}})$ tartományban újabb t_{Σ}^j értékeket meghatározva $t_{\Sigma}^{\min} < t_{\Sigma}^j < t_{\Sigma}^{\text{opt}}$ kiszámítjuk az ehhez tartozó K_{Σ}^j költségeket és a

$$p_r^j = \frac{B_d - K_{\Sigma}^j}{t_{\Sigma}^j}$$

nyereségrátát. Eközben a keresési tartományt is fokozatosan csökkentjük.

Az iterációt mindaddig folytatjuk, ameddig a keresési tartomány, vagy a közelítően számított

$$p_r^j - \left| \frac{dp_d^j}{dt_{\Sigma}^j} \right|$$

különbség a megadott pontosságot nem éri el.

Az iteráció gyors konvergenciáját a $P_r(t_d)$ nyereségráta függvény tulajdonságai garantálják.

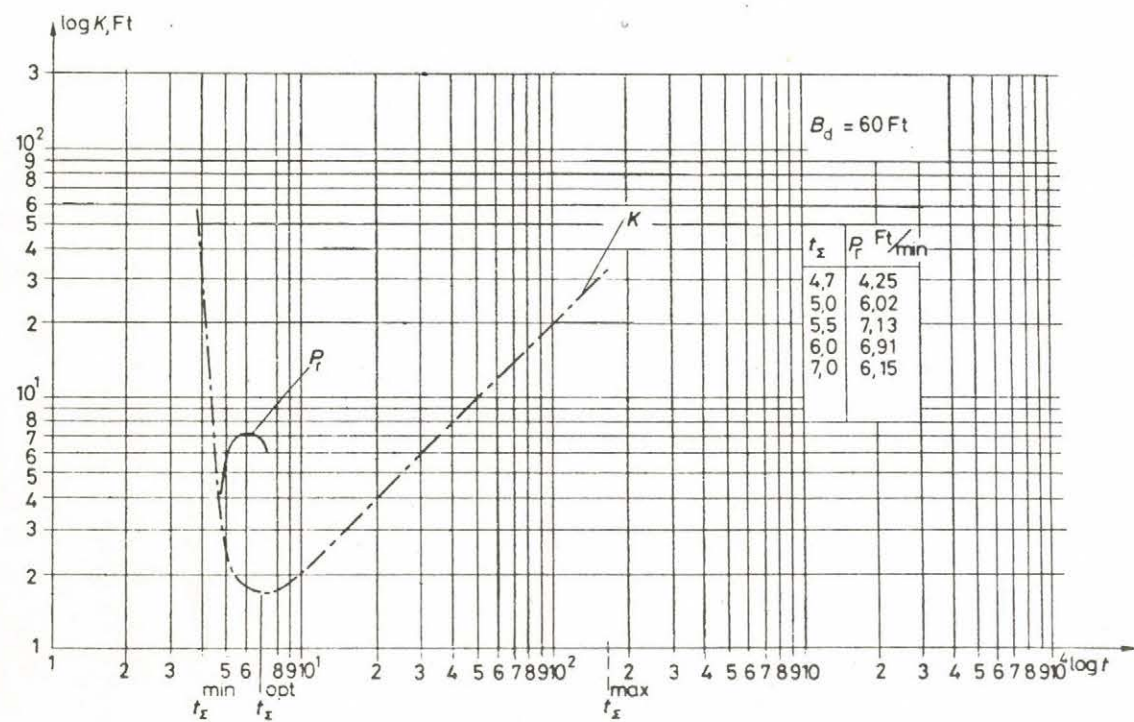
Itt jegyezzük meg, hogy a t_{Σ} időértékek nemcsak a megmunkálási időket, hanem a mellékidőket és a szerzőszámcsere időhányadokat is kell hogy tartalmazzák. Ez a javasolt eljárást semmilyen módon nem befolyásolja.

A vázolt módszer nemcsak egy-egy munkadarabra, hanem több munkadarabból álló egységre, vagy gyártmányra is változatlanul alkalmazható.

Mivel a nyereségráta a termelés fontos jellemzője, az itt vázolt módszer szintén tulmutat a megmunkálási folyamaton és fontos információt nyújt a vállalatvezetési döntésekhez.

Szemléltetésként a 2.32. ábrán a másodlagos optimáláskor elemzett példára bemutatjuk a nyereségráták számítását.

A nyereségráta optimálás korábban vázolt módszerét főleg a tömeggyártásban érdemes alkalmazni, ahol a három számítási lépés gazdaságilag igazolható. A tömeggyártás állandó ritmusa talán igazolja a gyártás statikus folyamatként való kezelését is, amely a módszer kiinduló feltétele. Fel kell ugyanis tételeznünk, hogy sem a piaci értékesítési feltételek változásai, sem a termelés változó körülményeiből eredő zavarások nem gyűrűződnek be az adott alkatrész gyártási mikrokörnyezetébe, az alkatrészre lefoglalt berendezések állandósult feltételek mellett, zavartalanul és ütemesen "gyárthatják" a nyereséget. A valóságban az ideiglenesen fellépő szűk keresztmetszetek, más alkatrészek magasabb prioritása, a piac tranziens jelenségei begyűrűznek a műveletele-



b)

2.32. ábra. nyereségráta változása (b)

mek szintjére is és megzavarják az idillikus feltételeket. A magasabb szintű feltételek alacsonyabb szinteken a célfüggvény újrafogalmazását teszik szükségessé, s rendszerint azt eredményezik, hogy a vállalat a maximális nyereséget nem akkor éri el, amikor minden műveletelemre legnagyobb a nyereségráta. Az éppen aktuális szűk keresztmetszetek pl. veszélyeztetik egész szállítási tételek sorsát, s ilyenkor ezek felszámolása - tehát a legnagyobb termelékenység - adja a leszállítandó gyártmányok időben való értékesítéséből származó maximális nyereséget. Egy-egy művelet megnövekedett önköltsége a teljes bevételhez viszonyítva elhanyagolható. Máskor viszont - egyéb szűk keresztmetszetek vagy a gyártórendszer leterheltsége miatt - értelmetlen erőszakolni a maximális nyereségrátát valamely alkatrészre, hiszen eredményei ugysem realizálhatók. Ilyenkor a célfüggvényt ésszerű a legkisebb költségre átfogalmazni, sőt még tovább csökkenteni a megmunkálás intenzitását.

E rövid fejtegetésből is nyilvánvaló, hogy bár a másodlagos optimálás módszerével a nyereségráta korrektül kezelhető, önmagában a hatékony módszer nem elegendő a legnagyobb vállalati nyereség eléréséhez. A termelés átfogó megszervezése és irányítása,

a pillanatnyi feltételeknek legjobban megfelelő cél-
függvény és korlátok meghatározása, az átfutási idők
csökkentése kívül esik a technológiai adatok opti-
málásának hatáskörén, ezért nyilvánvaló, hogy a tech-
nológiai tervezési eredmények realizálásának elő-
feltétele a korszerű és hatékony termelésirányítás,
a tervezés és irányítás tökéletes összehangolása.

3. Termelési rendszerek és optimálási problémáik

Az eddigiek során a műveletelemből mint alaptól kiindulva megpróbáltuk az optimálás problémáját szisztematikusan tárgyalni.

Műveletelemek optimális technológiai adatainak meghatározása jól megfogalmazható és, mint bemutattuk, hatékonyan megoldható feladat.

Bármilyen módon oldjuk meg a gyártáselőkészítés többi problémáját, ez az utolsó szint, amely megkoronázza az egész tevékenységet.

A műveletelemek adatai különböző célok szerint választhatók meg. Elterjedt ezek /mint a korábbiakban részletesen tárgyaltuk/ legkisebb költséget, legkisebb időt /legnagyobb termelékenységét/, legnagyobb nyereséget stb. eredményező megválasztása. Bár a problémákat műveletelemekre fogalmazták meg, mind a legkisebb költség, mind a legkisebb idő vonatkozásában az eredmények a munkadarabokra is érvényesek maradnak. Könnyen belátható, hogy a műveletelemek optimális adatai az általuk létrehozott munkadarabra megfogalmazott összeg célfüggvény szerint is optimálisak. Lényegében tehát ez volt a két szempont, amelyek között a gyártáselőkészítő, a termelés-

irányító szakemberek választhattak. Különböző más törekvések, változatok is előfordultak, de megalapozatlanságuk miatt nem terjedhettek el.

A jelen munkában javasolt másodlagos optimálási módszer a problémát egy szinttel magasabbra viszi. Amikor ezt alkalmazzuk, már a feladat megfogalmazása is olyan, hogy közvetlenül a gyártáselőkészítés és termelésirányítás számára megfogalmazható kategóriákat tartalmaz. Manipulálhatóvá teszi a költség, idő, szerszám elhasználódási jellemzőket.

Különösen világos a másodlagos optimálás és a termelésirányítás kapcsolata, mint ezt a módszer feltételrendszere is megmutatta.

Igy nem véletlen, hogy a legnagyobb nyereségre való optimálás a másodlagos optimálási módszerrel való kapcsolatában kapott szabatos megoldást.

Amikor optimálásról beszélünk, világos különbséget kell tennünk a gyártás méreteitől függően.

Tömeggyártáskor az optimálás különleges jelentőséget kap, hiszen viszonylag állandó körülmények között /rendszerint/ nagy értékű, ütemes termelés folyik. Értelme van az egész rendszer adott feladatokra legalkalmasabb felépítésének. Az optimálás adatszükséglete akár egyedi kísérletek árán is biztosítható.

A részletes elemzéseknek, amelyek akár a legnagyobb nyereségre optimálást, vagy a másodlagos optimálással elérhető más eredményeket /szerszám kopás összehangolás, kibocsájtási ütem összehangolás stb./ hozzák, jelentős szerepe van.

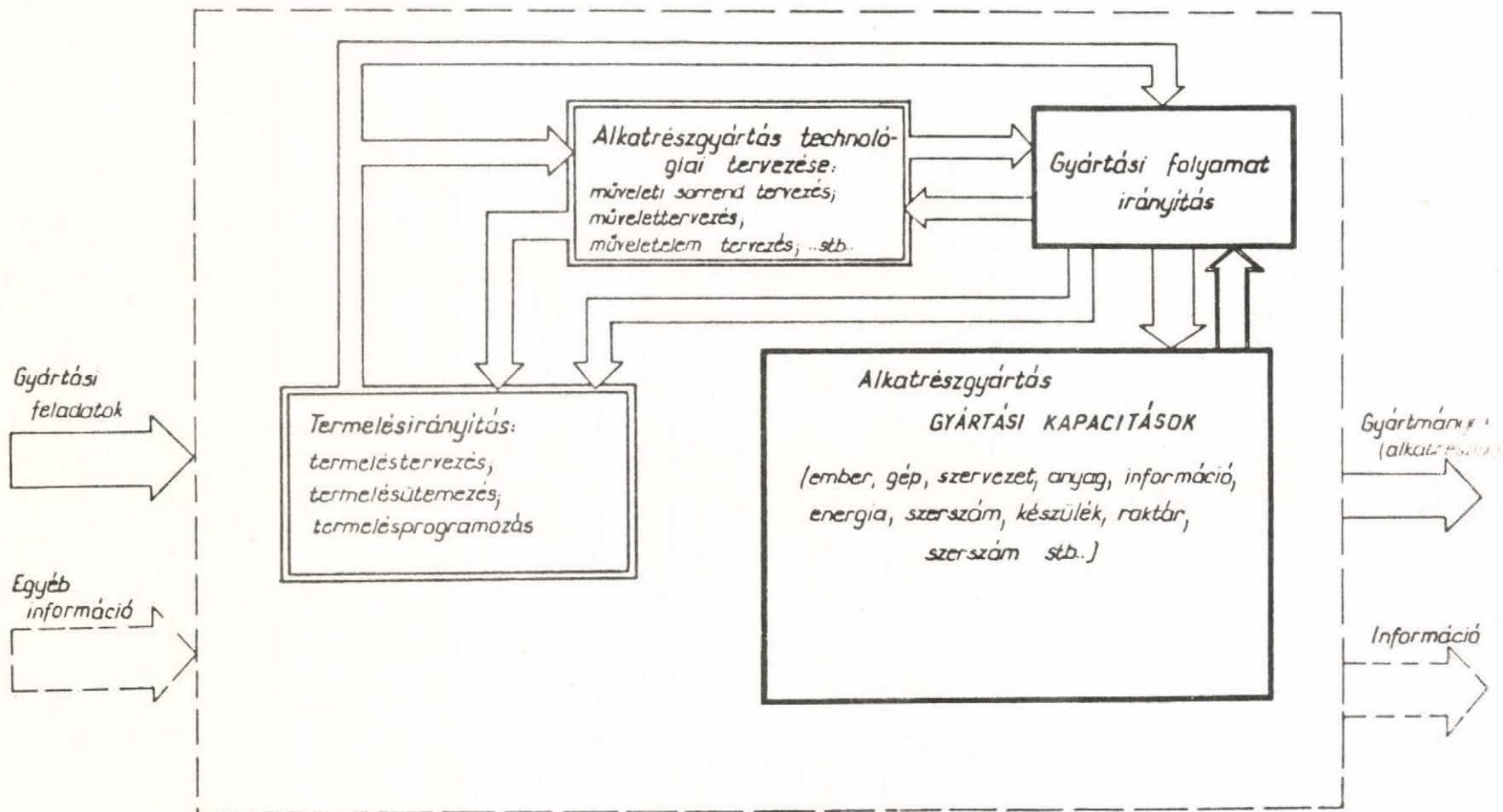
Az állandó körülmények miatt a kapott megoldások megvalósíthatóak és huzamosan alkalmazhatóak. A fentiek érvényesek nagysorozatok gyártásakor is.

A korszerű gépiparban, mint azt az elemzések, előrejelzések kifejtik, egyre fokozódó jelentősége van a kis sorozatban, vagy akár egyedileg /esetleg visszatérő jelleggel/ gyártott alkatrészeknek.

Éppen az ilyen jellegű termelést szolgálják a gépipari gyártás legprogresszivebb egységei, az integrált, flexibilis gyártórendszerek, gyártócellák.

A jelen pontban tárgyaltak - a konkrét helyzettől függően, különböző nézőpontok szerint - érvényesek a legtöbb gépipari gyártórendszerre. Alkatrészgyártási rendszerek egyszerűsített vázlatát a 3.1. ábrán adjuk meg.

Célszerű az optimálási problémákat kissé specializáltan, az integrált anyag- és adatfeldolgozó rendszerek példáján tárgyalni, mivel ezekben



3.1. ábra. Az alkatrészgyártási rendszer egyszerűsített vázlata

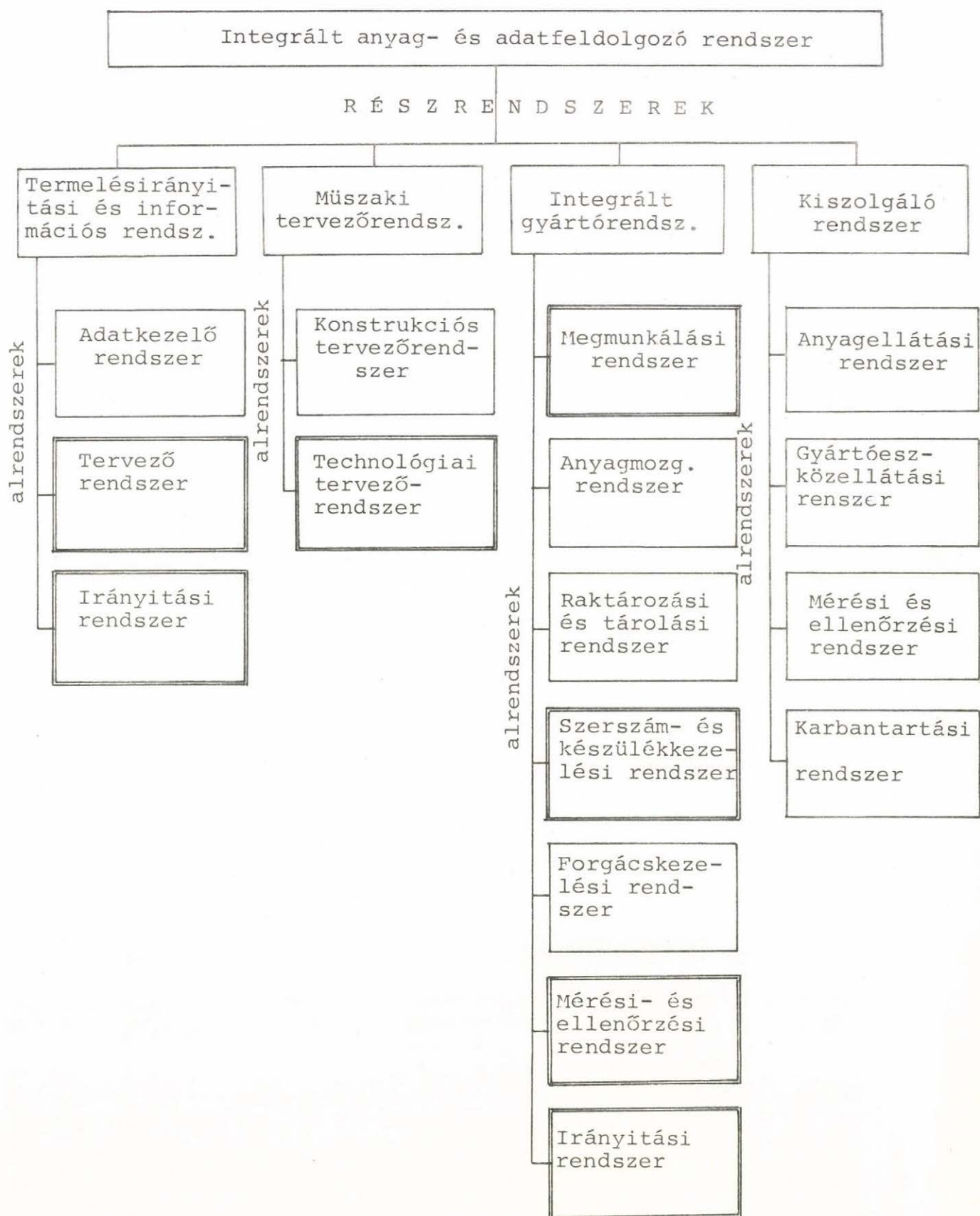
a berendezések hatékony kihasználása alapvető jelentőségű. Ezt az is indokolja, hogy az integrált gyártórendszerekben rendelkezésre áll, kisebb vagy nagyobb mértékben, az optimáláshoz elengedhetetlen adatfeldolgozási lehetőség.

A 3.2. ábrán integrált anyag- és adatfeldolgozó rendszerek alrendszerei csoportosításának egy lehetséges változatát adjuk [3.1].

Azokat a szinteket, amelyekkel a megmunkálási folyamat, és így a forgácsolási adat optimálás közvetlen kapcsolatban van, az ábrán kettős keretbe foglaltuk.

Az alrendszerek közül a forgácsolási folyamat optimálásával legközvetlenebb kapcsolatban a termelésirányítás tervező rendszere és az alkatrészgyártás technológiai tervező rendszere áll.

Tekintsük át röviden ezeknek a rendszereknek a szintjeit és a főbb feladataikat.



3.2. ábra. Integrált anyag- és adatfeldolgozó rendszerek felépítése, alrendszerei

3.1 A termelésirányítás hierarchikus szintjei [3.2]

A termelésirányítás több, hierarchikusan egymásba illeszkedő szinten megy végbe. A magasabb szint hosszabb időszakot fog át és csak a fontosabb szempontokat képes áttekinteni. Az alacsonyabb szinten a felsőbb szintről kapott irányítási döntések alapján készítik el az egyre részletesebb, de egyre rövidebb időperiódusra vonatkozó irányítási döntéseket. Ugyanakkor azonban, ha az alsóbb hierarchikus szint megoldhatatlan feladatot kap /akár azért, mert a magasabb szint nem tudott mindent figyelembe venni, akár azért, mert a körülmények időközben megváltoztak/, akkor visszajelez az eggyel feljebb lévő szintre, ahol módosítást kell végrehajtani.

A következő három alapvető irányítási szintet különböztetjük meg:

- termeléstervezés,
- termelésütemezés,
- termelésprogramozás.

Termelésstervezés

Egy hosszabb időszakra /1-3 hónap/ a rendelkezésre álló erőforrásokat /ember, gép, anyag, energia, raktár stb./ figyelembe véve a vállalati céloknak legjobban megfelelő termelési tervet kívánunk létrehozni. A vállalati célok rendszerint sokrétűek:

- gyártási kötelezettségek,
- vállalási határidők,
- gazdaságos termelés,
- önköltségcsökkentés,
- minőségjavítás,
- a termelékenység növelése,
- a berendezések viszonylag egyenletes terhelése,
- a nyereség növelése,
- az export növelése stb.

Ezeknek a céloknak összeegyeztetése általában igen nehéz. A termelésstervezés matematikai modelljében az erőforrások korlátozó feltételként szerepelnek. Ezen túlmenően a célok többségét ugyancsak korlátozó feltételnek tekinthetjük, ugyanis csak olyan tervet fogadunk el, amely ezeknek a céloknak legalább valamely előre megadott mértékben eleget tesz. A legfontosabb cél lesz az optimálási feladat

célfüggvénye. Amennyiben egyetlen cél kiemelése nem reális, akkor néhány célfüggvény súlyozott összegével is dolgozhatunk. A feltételek közé helyezett célok teljesítési szintjei a feladat paraméterei.

A termeléstervezés az éves vagy ennél is hosszabb távu munkavállaláson alapszik és annak kedvezőbb alakítását is lehetővé teszi. Ezenkívül a már elvállalt gyártási feladatokat legmegfelelőbben csoportosítja és 1-3 hónapos időközökre bethervezi. Feladata tehát nemcsak a következő időszak lehető legjobb tervének elkészítése, hanem gondoskodni kell arról is, hogy az egymást követő időperiódusok egyformán jól tervezhetők legyenek. Továbbá már a tervezés során az eggyel alacsonyabb irányítási szint, a termelésütemezés legfontosabb szempontjait is szem előtt kell tartania.

Minthogy minden komplex gyártási folyamatban vannak véletlenszerű tényezők, a terv ellenőrzéséről és esetleges korrekciójáról is gondoskodni kell. Erre szolgál a csuszótervezés, amelyet dinamikus tervezésnek is nevezhetünk. A csuszótervezés lényege, hogy a tervperiódus /pl. 1 hónap/ egy részének /pl. első hetének/ elteltével újabb négyhetes tervet készítünk, melynek első három hete az előző

terven alapul, de figyelembe veszi a közben bekövetkezett változásokat. A negyedik hétre új terv készül, amely illeszkedik az előzőkhöz, a feladatokhoz, a lehetőségekhez és figyelembe veszi a célokat. Célszerű a tervezésben is elkerülni a túl nagy időbeli ugrásokat, így az éves tervet negyedévesekre, a negyedéveseket havi tervekre bonthatjuk le. Mind a három havi, mind a négyhetes tervek csuszótervezéssel készülhetnek.

Amennyiben egyes termékek gyártási ideje hosszabb, mint egy tervperiódus, akkor a hosszabb idejű tervnek a részfeladatok végső határidejét ki kell jelölnie. Ennél - indokolt esetben - előbb elkészülhet a részfeladat /alkatrész/, később nem.

Termelésütemezés

A termeléstervezés során több száz vagy több ezer munkadarab gyártási idejéről döntünk. /Melyik hónapban, melyik héten kerülnek gyártásra./ Nyilvánvaló, hogy a tervezés szintjén nem foglalkozhatunk sem a pontos időbeosztással, sem egyéb mikrokörnyezeti problémákkal, amelyek az egyes munkadarabok egyidejű gyártásakor felmerülnek. A termelésütemezés feladata, hogy rövidebb időszakra /7-10 napra/ az előzőleg elfogadott havi terv alapján elkészítse a

munkák elvégzésének részletes ütemtervét. Ez magába foglalja az esetleges alternatív megmunkálási sorrendek közötti választást, az egyes munkák vagy az azokon végzett műveletek részére a megfelelő berendezés vagy berendezéscsoport kiválasztását és mindenekelőtt a munkák elvégzésének időbeli ütemezését. Ez az utóbbi feladat elsősorban egyes munkák és műveleteik elvégzésének sorrendjét jelenti. A termelésütemezés kapcsán a terven és a berendezések kapacitásán túl a következő szempontokat kell figyelembe venni:

- az egyes gyártási sorrendek anyagi és minőségi kihatásait,
- a raktárkészletek alacsony szinten tartását,
- az egyes berendezések zökkenőmentes együttműködésének megvalósítását /azaz, hogy a technológiai sorban előbb álló berendezések kellő időre anyagot szolgáltatassanak a következőknek/,
- a berendezések viszonylag egyenletes terhelését,
- az azonos vagy részben azonos funkciót ellátó berendezések között a munka optimális megosztását,
- a szerszámok, az alap- és a segédanyagok gazdaságos kihasználását.

Termelésprogramozás

A termelésirányítás felsőbb szintjei mindig valamilyen tervezett vagy feltételezett helyzetből indulnak ki. A termelésprogramozás azonban a tényeket tükröző adatok alapján rövid időre /8-24 óra/ részletesen rögzíti a termelés menetét. A kiindulópont itt is az eggyel magasabb irányítási szintnek, a termelésütemezésnek szóban forgó időre /1 műszakra, vagy ...1 napra/ eső része. Egyrészt ellenőrizni kell, hogy a szükséges erőforrások és anyagok rendelkezésre állnak-e, továbbá az esetleg módosult körülmények között nem célszerű-e jelentős módosítást végrehajtani. Másrészt a termelésprogramozás kevesebb anyaggal és rövidebb időperiódussal foglalkozik, így lehetővé válik, hogy a termelés teljes folyamatát kézben tartsa. Magasabb szinten bizonyos szerelési, anyagmozgatási, szerszám-előkészítési és sok más egyéb tevékenységet még nem lehet figyelembe venni. Ennek csak egyik oka az, hogy az igen nagy számú tevékenység és összefüggésük áttekinthetetlenné, kezelhetetlenné válik. Legalább ennyire fontos, hogy a legpontosabban végrehajtott gyártás esetén is vannak időbeli bizonytalanságok és váratlan események. Ezek áthidalása is a termelésprogramozás feladata. Az elkészült termelési programnak természetesen egy bi-

zonyos határig rugalmasnak kell lennie. Ha a termelés ennél nagyobb mértékben tér el az előírttól, akkor kellő időben új, módosított termelési programot kell készíteni.

A termelésprogramozás fő feladata tehát, hogy a zökkenőmentes termelést valósítsa meg az irányítás magasabb szintjein megadott elvek és tervek szerint. Ha módosításra van szükség, mert a tények a tervezettől lényegesen eltérnek, akkor a termelésprogramozásnak át kell hidalnia azt az időt, ami az ütemezés és esetleg a termeléstervezés feladatai újbóli megoldásáig eltelik.

Ezen túlmenően, ha a terv vagy az ütemezés megvalósításának veszélye nélkül még mindig sok alternatíva van, akkor törekedni kell

- a jobb minőségre,
- a szerszám-, az anyag-, és az energiatakarékoságra,
- a berendezések viszonylag egyenletes terhelésére, továbbá ha lehetőség nyílik, akkor mindazon szempontok figyelembevételére, amelyek a termelésirányítás felsőbb szintjein felmerültek.

A termelésirányítás számára kiinduló adatokat az alkatrészgyártás technológiai tervezése nyújt.

3.2. Az alkatrészgyártás technológiai tervezésének hierarchikus szintjei [3.2]

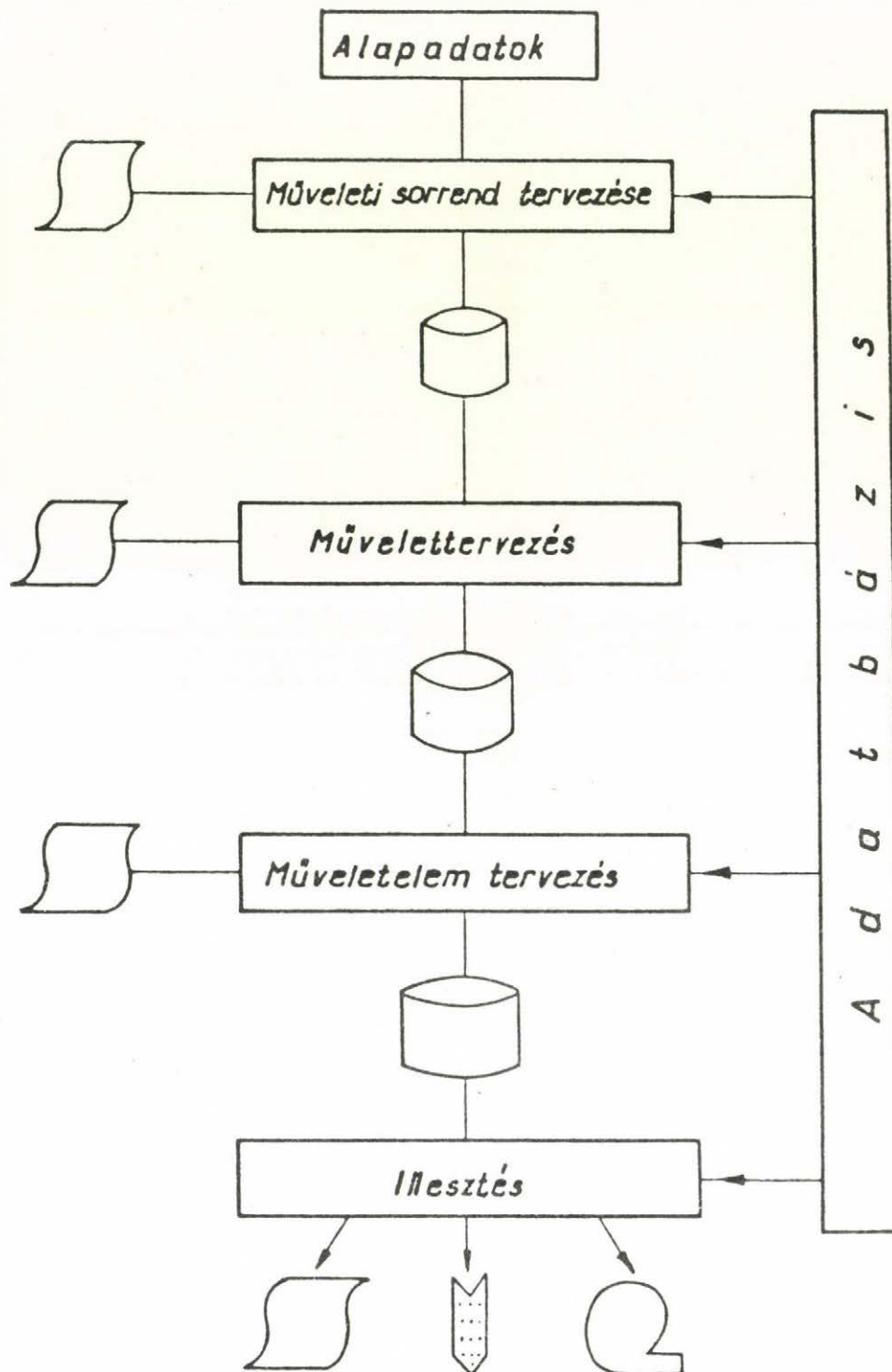
Az alkatrészgyártás technológiai tervezését három hierarchikus szintre osztjuk:

- műveletisorrend-tervezés,
- művelettervezés,
- műveletelem-tervezés.

A 3.3. ábra a szintek egymásra épülését és a közöttük fennálló információcserét mutatja.

Az alkatrészgyártás tervezésekor egyik leglényegesebb feladat a megmunkálási eljárások, megmunkálási módok helyes megválasztása. /Megmunkálási módon azt a megmunkálási tevékenységet értjük, amellyel egy bizonyos nagyságu munkadarab adott mérettartományba eső felületét /felületelem-csoportját/ feltételezett szerszámfajtaival, meghatározott minőségre /felületi érdesség, méret-, alakpontosság stb./ megmunkáljuk./ Ezek birtokában határozzuk meg a munkadarab legyártásához szükséges gyártóberendezéseket, a megmunkálás alatti munkadarab helyzeteket.

A megmunkálási sorrend és a művelethatárok kijelölése után meghatározzuk azokat a munkadarab állapotokat, amelyekbe egy-egy művelet végrehajtása után kerül a munkadarab. A gyártóberendezés, a megmunká-



3.3. ábra

lási mód, a megmunkálás alatti munkadarab helyzet és a megmunkálás előtti munkadarab állapot ismeretében munkadarab befogó készüléket választunk vagy tervezünk.

Az eddig ismertetett tevékenységek összességét műveletisorrend-tervezésnek nevezzük.

A műveletisorrend-tervezésen tehát azt a technológiai tervezési tevékenységet értjük, amelynek folyamán meghatározzuk a munkadarab elkészítéséhez szükséges megmunkálási eljárásokat és módokat, gyártóberendezéseket, kialakítjuk a műveleteket és sorrendjüket, meghatározzuk a megmunkálás alatti munkadarab helyzeteket és a használt készülékeket, továbbá a műveletek közötti munkadarab állapotokat.

A művelettervezés során egy adott gépen, adott felfogásban eltávolítandó anyagmennyiség leválasztását tervezzük meg.

Kialakítjuk azokat a geometriai és technológiai szempontból összefüggő ráhagyási alakzatokat, amelyeket egy adott szerszámmal távolítunk el. A ráhagyási alakzatok eltávolításához szerszámokat választunk, majd szerszámelrendezési tervet készítünk.

A művelettervezésen tehát azt a technológiai tervezési tevékenységet értjük, amelynek folyamán meghatározzuk a műveleti ráhagyás eltávolításához szükséges műveletelemeket, sorrendjüket, meghatározzuk az egyes ráhagyási alakzatok eltávolításához

szükséges szerszámokat és elrendezzük azokat a szerszámgép szerszámtartóiban.

A szerszám mozgáspályáinak és a pályaszakaszok mentén a forgácsolási adatoknak a meghatározása a műveletelemtervezés feladata.

A következőkben a termelésirányítás és a technológiai tervezés optimálásának néhány aspektusával foglalkozunk. Általánosságban ez a témakör messze túlnő a jelen munka keretein. Ennek megfelelően csak azokat a kérdéseket tárgyaljuk, ahol felfedezhető a magasabb szint közvetlen kapcsolata a megmunkálási folyamat elemi szintjeinek optimálásával.

Az előbbiekben a termelésirányítási szintet előbb tárgyaltuk, mint a technológiai tervezést. Ennek oka az volt, hogy a műveletelemekre vagy munkadarabokra megfogalmazott optimálás egyszerűbben hozható kapcsolatba a termelésirányítási szempontokkal. A következőkben viszont a sorrendet megfordítjuk. Egyrészt azért, mert a feladatok időbeli végrehajtásának ez a természetes utja. Másrészt azért, mert a műveletelem adat optimálás nemcsak kapcsolatba hozható a technológiai tervezéssel, hanem annak részét alkotja.

Mielőtt a technológiai tervezés és a termelésirányítás optimálási problémáit és kapcsolataikat

tárgyalnók, szükséges, hogy megvizsgáljuk hierarchikus gépipari rendszerek optimálásának problémáját általánosságban is. Ennek során a rendszerszemléletű alapállás csak olyan lehet, amely szerint a tervezési, irányítási és gyártási folyamatok egészére keressük az optimumot.

Bonyolult, összetett rendszerek egészére célfüggvényeket megfogalmazni rendszerint kilátástalan törekvés. Ugyanakkor szintenként megfogalmazódnak a célfüggvények, követelményrendszerek és korlátozások.

Az egész rendszer optimumára törekvés gyakorlatilag járható útja, hogy az optimálást szintenként oldjuk meg, miután tisztáztuk az aktuális szint kapcsolatát az alulról, felülről és oldalról csatlakozó szintekkel. A magasabb szint általában kijelöli az optimumkeresés korlátaival, a célfüggvényeket az alacsonyabb szint számára. Követelményei begyűrűznek, mint meghatározó zavarások az alacsonyabb szintre. Ezek a megoldás során kiegészülnek a szint saját feltételrendszerével, zavarásaival. Az eredeti, legmagasabb szinten megfogalmazott célfüggvények - a cél megőrzése mellett - az egyes szintek sajátosságainak, lehetőségeinek megfelelően átalakulhatnak. Az alsóbb szintek visszacsatolással hatnak a maga-

sabb szintekre is, elsősorban korlátozások és zavarások formájában.

Az optimálási problémák megoldásakor a felsőbb szinteken rendszerint szükséges, hogy az alacsonyabb szint optimálásának eredményei ismertek legyenek. Mégpedig olyan módon, hogy az alacsonyabb szint feltételrendszerében szerepelnek a magasabb szint követelményei.

Nyilvánvaló, hogy a dimenziók óriási mértékűvé növekedése korlátot szab az ilyen jellegű kapcsolatok explicit realizálása elé. Azonban becslések, heurisztikus alapú kvázi-optimalis megoldások széles körű alkalmazást nyerhetnek. Azoknak a problémáknak az explicit megoldásai, amelyeknek a fent vázolt aspektusok szerinti megfogalmazása és hatékony megoldása lehetséges, szilárd támpontul szolgálhatnak az egész rendszer optimálására való törekvésekben.

3.3. Az alkatrészgyártás technológiai tervezésének szintjei és optimálási problémáik

3.3.1. Műveletisorrend-tervezés

A megmunkálási folyamat gazdaságosságára a különböző szinten hozott döntések nem azonos hatásuk.

A helyes vagy helytelen döntés kihatása a gyártás gazdaságosságára műveletisorrend-tervezéskor lényegesen nagyobb, mint a forgácsolási adatok meghatározásakor. A szerszámgép megválasztásakor például úgy kell dönteni, hogy megteremtsük a művelet és műveletelem szintű feladatok - a gyártási folyamat szempontjából optimális - megoldásának lehetőségét.

A magasabb szintű döntések meghozatalakor, az adott szinten meglévő korlátozások mellett az alacsonyabb szint igényeit és lehetőségeit is figyelembe kell venni. Az alacsonyabb szintről csak akkor állnak pontos információk rendelkezésünkre, ha már azt részletesen megterveztük.

Ehhez pedig ismét egy alacsonyabb szint részletes megtervezése szükséges. A gyakorlatban a részletes megtervezés helyett /a számítás hosszadalmas volta és a variánsok nagy száma miatt/ a magasabb szintű döntésekben az alacsonyabb szintekről származó pontos adatok helyett normatív adatokkal számolunk.

A tervezési folyamat algoritmizálhatósága az alacsonyabb szinteken egyszerű feladat /1. technológiai tervező rendszerek szerszámmozgás- és forgácsolásiadat-számító moduljai/. Magasabb szinteken a változók nagy száma miatt a feladat egyre ne-

hezebb, egyre nagyobb szerepet kap a megoldásokban a mérnöki intuíció.

A konkrét megoldást több tényező nehezíti:

- A legtöbb problémát a variációk nagy száma okozza. A variációk számának csökkentése a megmunkálási lépcsők számának csökkentésével /durvább állapotfokozatok meghatározásával/ érhető el.

A megmunkálási lépcsők számának redukálása viszont a műveletisorrend-tervezés érvényességét csökkenti.

- A célfüggvényt egzakt módon ugyan fel tudjuk írni, de pontos adatokkal nem tudjuk feltölteni. Ugyanis az egyes gyártóberendezéseken alkalmazott megmunkálási módok mellé csak normatív költség- és időadatokat irhatunk. Ezek a normatívák részben becsült értékek, részben közelítő számításokon alapulnak, nem követik rugalmasan a technológiai színvonal emelkedését, a termelési költségekben beállott változásokat.

- A korlátok - hatásukat, természetüket tekintve - nem egységesek. Egy részük a választási lehetőségeket, más részük a sorrendi egymásutániségot korlátozza.

E nehézségek miatt igen gyakran meg kell elégednünk az optimáláshoz közel álló megoldással,

amelyet úgy nyerünk, hogy a tervezést a tapasztalati rokonesetek alapján optimumesélyesnek vélt megoldásokra szűkitjük és irányítjuk.

A műveletisorrend-tervezés optimálása a számítógépes tervező rendszerek fejlesztése során lett elsőrendű jelentőségű kérdés.

A számítógépes műveletisorrend-tervező rendszerek kétféle alapelv alapján épülnek fel, az egyik a variáns vagy tipustechnológiai elv, a másik a generáló vagy szintetizáló elv.

A fenti elveken alapuló módszerek ismertetése és értékelése nem feladata a jelen munkának. Megemlítjük azonban, hogy világszerte és ezen belül hazánkban is megjelenőben vannak /sokszor a művelettervezési feladatok mellett sorrendtervezési feladatokat is ellátó modulok formájában/ olyan rendszerek, amelyek műveletisorrend-variánsokat határoznak meg, tekintetbe véve az optimálás fentebb taglalt szempontjait, lehetőségeit is.

Különös sullyal veszi tekintetbe ezt a lehetőséget a BME Gépgyártástechnológiai Tanszékén, Horváth Mátyás vezetésével kifejlesztett rendszer [3.3; 3.6], amely a műveletisorrend-variánsokat a generáló elvhez közeli módon, de felhasználva a variáns elv előnyös tulajdonságait, határozza meg.

Visszatérve az előbbiekre, leszögezhető, hogy nagyon egyszerű esetek kivételével, a feladat dimenziójának hatalmas méretűvé növekedése miatt, a műveletisorrend-tervezés és a műveletelem szintű optimálás közvetlen kapcsolatba nehezen hozható.

Reálisabb ut, amelyet a BME Gépgyártástechnológiai Tanszék követ, amely a sorrendi alternatívák előállítását a gépválasztással egybevontan végzi. A szerszámgépekről változó dinamikus adataink vannak, amelyeket a gép- és rendszertáblák rögzítenek. A termelésprogramozás ezen a szinten csatlakozik a sorrendtervező rendszerhez. Egyrészt a választható gépek sorából törli azokat a gyártóberendezéseket, amelyekre a gyártási időpontban nem számíthatunk. Másrészt döntési kritériumokat szolgáltat az optimális alternatíva kiválasztásához.

Az optimális sorrend megkeresése előtt a rendszer a munkadarab jellegének, sorozatnagyságának megfelelően szűkíti a szóba jöhető gépek számát, majd rangsorol aszerint, hogy ezeken milyen tevékenységek hajthatóak végre és ezek milyen súllyal esnek latba a munkadarab egészét illetően.

A variánsok közül ezek után nem szükséges az összes lehetségeset végignézni, mert a rangsorolással az optimumesélyes megoldásokat előre hozhatjuk.

Az optimumkritériumot a termelési programozás szolgáltatja, amely a minimális gyártási költség, idő, maximális műveletkoncentráció vagy egyenletes terhelés lehet. Ezeknek a kritériumoknak az alapján dönthető el, hogy az optimumesélyes sorrendi változatok közül melyik az optimális. A tevékenységek sorrendjének meghatározása után kijelölhetők a műveleti határok.

Mindez természetesen csak becsléseken alapulhat, hiszen a tervezésnek ezen a szintjén jönnek létre azok az adatok, amelyek a művelettervezéshez szükségesek, amelynek során határozhatók meg a konkrét számszerű mutatók.

Az az elvileg kecsegtető út, hogy a lehetséges variánsokra megoldják a művelettervezés feladatait, mint említettük, a dimenziók növekedése miatt, itt a gyakorlati felhasználásra teljességgel alkalmatlan.

Világos azonban, hogy a kiválasztott variánsokra meg kell oldani a művelettervezés feladatait, a műveletelemek adatainak meghatározásáig bezárólag. Az eredmények /a másodlagos optimálással megkapható hatásokat is ideértve/ értékelések és későbbi becslések alapjaiul szolgálhatnak.

3.3.2. Művelettervezés

A művelettervezés alapadatait a műveletisorend-tervezés eredményei adják:

- az alkatrész adott műveletre érvényes nyers és készállapotának leírása;
- a művelethez rendelt megmunkálógép;
- az alkatrészbefogás jellemzői;
- optimalálási kritérium;
- esetleges technológiai előírások.

Az utóbbi adatcsoport között szerepelhetnek az alkatrész egyes felületelemeihez és elemcsoportjaihoz a műveletisorend-tervezés szintjén hozzárendelt megmunkálási módok és azok végrehajtási sorrendje.

A művelettervezés alapvetően a nyers és készdarab leírásából indul ki és figyelembe véve az adott gép és befogási mód jellemzőit, meghatározza, hogy az adott műveleten belül:

- az alkatrész megmunkálása milyen műveletelemekkel, milyen sorrendben történjék;
- az egyes műveletelemekkel milyen ráhagyási alakzatot kell eltávolítani;
- a műveletelemek végrehajtásához milyen szerzőkészlet szükséges és hogyan kell azt elhelyezni a gépen.



A művelettervezés eredménye tartalmazza a művelet részletes leírását a műveletelemekhez tartozó forgácsolási paraméterek és szerszámmozgások kivételével.

A művelettervezés folyamata, a műveletisorrend-tervezéshez hasonlóan, jól szemléltethető technológiai gráfok segítségével. A gráfok éleihez megmunkálási vagy egyéb tevékenységek, csucsaihoz munkadarab állapotok vagy helyzetek rendelhetők.

A művelettervezés folyamata visszavezethető a technológiai gráf megfelelő - az egyes műveletekhez tartozó - szakaszainak pontosbitására. A tervezés előrehaladásával egyre hivebben lehet tükrözni az alkatrész egészének és egyes felületelemeinek állapotváltozási folyamatát - pontosbitva a gráf csucsainak számát és sorrendjét -, továbbá egyre megbízhatóbb adatok rendelhetők a gráf éleivel ábrázolt tevékenységekhez.

A technológiai gráfra megfogalmazható költség vagy nyereség típusu célfüggvény [3.2].

Az optimális megoldás problémái azonban - a variánsok nagy száma, az adatok pontatlansága stb. miatt - a művelettervezés különböző szintjein differenciáltan jelentkeznek. Megoldást itt is az optimumesélyes változatnak a gyakorlati tapasztalatok

alapján történő behatárolása vagy több lépcsős iterációs módszer alkalmazása jelent, mivel az egyes változatok kialakításához és értékeléséhez szükséges pontos információk gyakran csak a teljes technológiai tervezés befejezése után állnak rendelkezésre.

A művelettervezés automatizálását megoldó mai rendszerek többsége az optimumesélyes változatot az adatbázisban tárolt tapasztalati adatok alapján jelöli ki. A több lépcsős iterációs módszert csupán a [3.7] alkalmazza.

3.3.3. A műveletelem tervezési szint

optimálásának helye a technológiai
tervezési folyamat hierarchiájában

A szakirodalom egy forgácsolási műveletet általában felfogástól felfogásig értelmet, ennek része a műveletelem, amelynek végrehajtásakor egy összefüggő ráhagyásalakzatot egy szerszámmal távolítunk el. Egyedi és kissorozatgyártásban egy művelet rendszerint több műveletelemből tevődik össze. A műveletelem végrehajtásakor a technológiai adatok általában változatlanok. /Kivétel pl. fokozatmentes hajtóművekkel ellátott gépeknél, vagy NC gépeknél fordulhat elő./ Ha ugyanazokkal a technológiai ada-

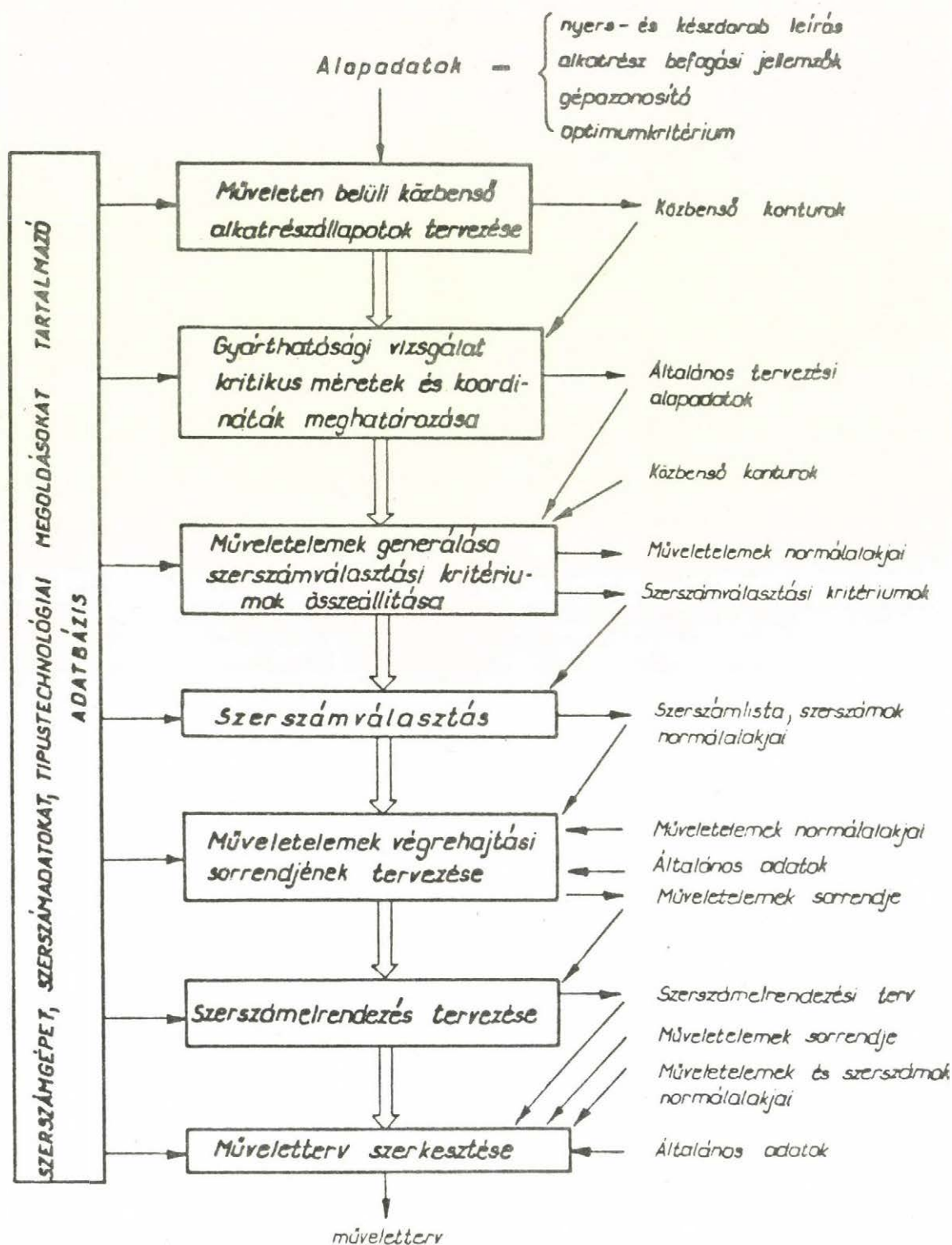
tokkal egymás után több felületelemet is megmunkálunk, műveletszakasról beszélhetünk. A továbbiakban a műveletelem fogalmát az elmondottak szerint értelmezzük.

A műveletelemek tervezésének három alapvető feladata van:

- a szerszámmozgásciklusok tervezése;
- a forgácsolási adatok meghatározása;
- a műveletelem műszaki időnormájának számítása.

Tekintsük a 3.4. ábrát. Tételezzük fel, hogy rendelkezésünkre áll az adott alkatrész egy lehetséges /műszaki szempontból elfogadható/ sorrend- és műveletterve mindazokkal a járulékos információkkal, amelyek a műveletelem tervezés szintjén bemenő adatokként szükségesek. Ragadjuk ki a műveleti sorrend tetszőleges - például i -edik - forgácsoló műveletét. Tartozzon ehhez a művelethez n számú műveletelem, amelyek végrehajtási sorrendje: $1., 2., \dots, n$. Korlátozzuk vizsgálatainkat most a j -edik műveletelemeire.

A korábbiakban a műveletelemek forgácsolási adatai meghatározásának problémáját részletesen tárgyaltuk. Amikor a munkadarab megmunkálásra szélesítettük ki a problémát /másodlagos optimálás/, bemutattuk, hogy a forgácsolási adatokra termelésirá-



3.4. ábra. A művelettervezés szintjei és egymásraépülésük

nyitási szempontok gyakorolhatnak hatást.

Ez a hatás változó jellegű, amely függ a termelés jellegétől és a környezet pillanatnyi állapótól, mivel a követelményeket a termelési szituáció határozza meg.

Más a helyzet a technológiai tervezéssel kapcsolatosan. Bár a legkorszerűbb rendszerek lehetővé teszik a termelési szituációhoz illeszkedő megoldásokat, mégis a technológiai tervezésre az a jellemző, hogy állandó jellegű megoldásokat produkál.

Mivel az állandó jellegű eredmények realizálhatósági esélyei sokkal kedvezőbbek, mint a változóké, célszerű az erőfeszítéseket ilyen irányba koncentrálni.

Ez egyben annak a heurisztikus elvnek az alkalmazását is jelenti, amely szerint egy alacsonyabb szintű rendszer működésekor elsősorban a közvetlen környezet, vagyis az eggyel magasabb szintű rendszer szabja meg a feltételeket az adott szint optimálásához. Jelen esetben tehát a műveletelem optimálását - saját szintjének feltételein túlmenően - mindennek előtt a művelettervezés eredményei befolyásolják. Ha a művelettervezés bizonyos optimumcélok kielégítésére törekedve történt meg - például megalapozott heurisztikus algoritmusok, technológiai megfontolások alapján alakítottuk ki a ráhagyásleválasztási

terveket, továbbá csökkentettük az üresjáratí és szer-
számcserekkel kapcsolatos mellékídköket - a művelet-
elem tervezés "peremfeltételei" már magukban hor-
dozzák a magasabb tervezési szint optimumának "át-
mentését" a műveletelem tervezés szintjére. E szint
optimálása a saját korlátozó feltételek mellett a
magasabb szintü optimumot tovább javítja /például a
forgácsolási adatok optimális értékeinek meghatáro-
zása révén/. Ha a művelettervezésben nem törekedtünk
optimumcélok kielégítésére, de műszakilag elfogad-
ható megoldást hoztunk létre, a műveletelem optimá-
lás hatékonysága ugyan csökken, de létjogosultságát
nem veszti el.

A szerszámmozgások célszerű megtervezése /köze-
lítő értelemben vett optimálása/ azoknak a heurisz-
tikus elveknek értelemszerű alkalmazását jelenti
egyetlen műveletelemre, amelyeket a műveletelemek
generálásakor és azok sorrendjének összeállítása fo-
lyamán - tehát egy tervezési szinttel magasabban -
már felhasználtunk. NC szerszámgépek esetére ez pél-
dával abban konkretizálható, hogy a gyors közelítés
és távolodás, rá- és túlfutás, kuszómenetes mozgá-
sok, elemi fogásosztó ciklusok utinformációs para-
métereit oly módon határozzuk meg, hogy a minőségi
követelmények és a megmunkálás biztonságának meg-

tartása mellett az üresjáratí veszteségidők a lehető legkisebbek legyenek.

A forgácsolási paraméterek /esztergálásnál például: fogásmélység, előtolás, forgácsolási sebesség/ optimálása a műveletelem tervezés kiemelten fontos feladata, mivel a gép és a gyártóeszközök, valamint a megmunkálási mód megválasztása után a műveletelem elé kitűzött követelmények teljesítése szinte kizárólag a forgácsolási paraméterek értékeitől függ. Ezek a követelmények részben műszaki /pl. a gyártandó alkatrészszel kapcsolatos minőségi előírások betartása/, részben gazdasági /pl. a gyártóeszközök megfelelő kihasználása, minimális költség/, esetleg szervezési /minimális végrehajtási idő/ jellegűek. Vagyis a műveletelem elé egyszerre több, egymásnak részben ellentmondó célt is kitűzhetünk; természetesen e célok számunkra nem egyenlő mértékben fontosak.

Míg a műszaki követelmények egyértelműen a technológiai tervezés szintjén fogalmazódnak meg, a gazdasági, szervezési követelmények már más szintek hatásait tükrözik.

Mint a 2. fejezetben tárgyaltuk, a műveletelemek szintjén az optimálási probléma szabatosan megfogalmazható és megoldható. Az ezen a szinten kapott



/vagy a munkadarabok szintjén másodlagos célok realizálását is lehetővé tevő/ eredmények adatok gyanánt szolgálnak a felsőbb szinteknek. Ezek alapján jön létre azután a felsőbb szintek reflexiója új követelmények alakjában.

A minimális költségű megmunkálás lehet a technológiai tervezés egészének is a legnyilvánvalóbb célja, amely a műveletelemek szintjén változatlanul jelentkezik.

Értelmes feladat lehet a technológiai tervezés szintjén a másodlagos optimálással megoldható szerzőszámfelhasználás szinkronizálása, vagy a bemutatott legnagyobb nyereséget eredményező adatokkal való megmunkálás. Azonban, mint a kifejtettek bemutatták, a technológiai tervezés sokrétű műveletei között olyan sok a nehezen formalizálható, sok kapcsolatu probléma, hogy az alapvető törekvés csak az lehet, hogy az egzaktul megoldható szinteket szervesen beépítsék a heurisztikus kvázi-optimális megoldások közé.

Ilyen munkák folynak a műveletisorrend-tervezés különböző feladatai, a művelettervezés közbenső alkatrész állapotainak, a szerszámválasztás, elrendezés feladatainak megoldására stb.

A fenti törekvéseket legáltalánosabban a BME

Gépgyártástechnológiai Tanszéken fejlesztett technológiai tervező rendszer tükrözi.

Az alábbiakban példát mutatunk be, hogy az egzakt módszerek hogyan építhetők be a heurisztikus tervezési módszerek közé. Ez a példa önmagában is jelentős problémával foglalkozik. Ez - a fogásosztás optimálása.

3.3.4. Fogásosztás optimálása

A 2. fejezetben a forgácsoló megmunkálás optimalására szolgáló matematikai modell megfogalmazásakor feltételeztük, hogy a fogásmélység "a" megadott érték. Általános esetben, amikor a ráhagyás nagyobb annál az értéknél, mint amit egy fogásban el lehet távolítani, ez a feltételezés nem helytálló. Ekkor a fogásmélységet is ismeretlen tényezőként kell kezelni.

Modellünk háromdimenzióssá válik. A probléma az $a_1, a_2, a_3, \dots, a_k$ fogásmélységek, valamint a hozzájuk tartozó $s_1, n_1, s_2, n_2, \dots, s_k, n_k$ előtolások és fordulatszámok olyan értékek meghatározása, amelyek mellett a

$$K = K_1 + K_2 + \dots + K_k$$

költség /vagy idő/ minimális. Ennek során nemcsak a fogásmélységet, hanem a fogások k számát sem ismerjük előre. Nyilvánvaló és lényeges korlátozás, hogy - mint említettük - a fogásmélység összegének a megadott R ráhagyást kell kiadniuk, azaz

$$a_1 + a_2 + \dots + a_k = R.$$

A költség /vagy idő/ számításakor figyelembe kell venni a visszafutások költségeit /idejét/, valamint a fogásvétellel kapcsolatos egyéb járulékos veszteségeket is.

Több megmunkálás esetében a költség-összefüggést egy-egy fogásra a következő alakban írhatjuk fel:

$$K = \frac{LC_M}{sn} \left(1 + \frac{C_T}{T} \right) + \frac{L_{vf} C_M}{s_{vf}} + C_M t_{ve} , \quad /3.1/$$

ahol

L a megmunkált hossz, mm,

L_{vf} a visszafutási hossz, mm,

s_{vf} a visszafutás sebessége, mm/min,

t_{ve} járulékos fogásonkénti veszteségidő, min.

A fogásosztás optimalizására kidolgozott módszerek közös vonása, hogy a feladatot kétdimenziósra re-

dukálják, azaz különböző megfontolások alapján előre megtervezik a ráhagyás leválasztását több változatban, minden változat mindegyik - immár ismert - fogásmélységéhez a már ismertetett módszerrel rendre kiszámítják az optimális s és n értékeket, majd a leválasztási tervek közül azt a változatot fogadják el optimálisnak, amely mellett a célfüggvény összegzett értéke minimálisra adódik.

A Magyarországon kidolgozott TAUPROG és TURNMOD rendszerben a ráhagyást különböző számú egyenlő fogásokra osztják el. A legkisebb fogásszámot a ráhagyás és a maximálisan megengedett fogásmélység felfelé kerekített hányadosa adja meg. Az így kapott fogásmélység mellett meghatározzák a célfüggvény optimális értékét, majd a fogások számát eggyel növelik, s az új fogásmélységgel újból elvégzik az optimálást. Az eljárást addig ismétlik, míg a fogásszám újabb növelésekor a célfüggvény értékének növekedését nem észlelik. Az utolsó előtti optimáláskor kapott fogásmélységet tekintik optimálisnak.

Ez a módszer jól alkalmazható akkor is, ha a ráhagyást nem egyenlő fogásokra, hanem meghatározott mérnöki - heurisztikus szabályok szerint osztják fel. Ilyen szabály lehet pl., hogy az első fogást az esetleges kéreg és a méretszóródás miatt külön kezelik, az utolsó fogást kisebbre veszik stb.

A módszer fokozatmentes előtolás és fordulat-szám változási lehetőségek esetén is jól alkalmazható.

Amikor az egyes fogások körülményei azonosak, a fenti eljárással a valódi optimumot határozzuk meg.

Ez a módszer egyszerű és hatékonyan alkalmazható például sik- vagy konturmaráskor, de amikor a ráhagyás és az átmérő viszonya kicsi, még esztergáláskor is.

Az optimális fogásozítás általános feladata, amikor az egyes fogások nem azonos feltételek mellett játszódnak le /például esztergáláskor az átmérő változik/ a Bellmann-féle dinamikus programozással oldható meg [3.8].

Szemléltetés gyanánt fogalmazzuk meg a fogásozítás optimálásának diszkrét modelljét. Legyen az elemifogásmélységérték, amelynél kisebbet nem lehet alkalmazni, Δa .

Ezután vizsgáljuk, hogy hányször Δa értékig legkedvezőbb a ráhagyást egy fogásban eltávolítani. Ez úgy állapítható meg, hogy minden $2\Delta a$, $3\Delta a$, $4\Delta a$ stb. esetben kiszámítják az egy és valamennyi lehetséges két fogásban való megmunkálásra az optimális megmunkálási költséget. Amikor megjelenik egy olyan változat, amelynél a kétfogásos megmunkálás költsége kisebb, mint az egyfogásosé, attól kezdve a rá-

hagyást két fogásban kell eltávolítani. Tételezzük fel konkrét példaként, hogy $12\Delta a$ értékig az egy fogásban való megmunkálás a kedvező. Ekkor a $13\Delta a$ esetben meg kell vizsgálni azokat a változatokat, amikor az első fogás Δa , $2\Delta a$, $3\Delta a$, ..., $12\Delta a$. Tételezzük fel, hogy $9\Delta a$ első és $4\Delta a$ nagyságu második fogás alkalmazásakor a megmunkálás összköltsége kisebb, mint $13\Delta a$ egy fogásban való eltávolításakor.

Tehát $R = 13\Delta a$ ráhagyás esetében két fogás, mégpedig a $9\Delta a$ első és $4\Delta a$ nagyságu második fogás az optimális.

Hasonló módszerrel határozható meg az optimális fogásosztás $14\Delta a$, $15\Delta a$, ..., stb. esetekre is. Azonban ezeknél már a három fogásban való forgácsolást is vizsgálat alá kell venni. A dinamikus programozás nagy előnye itt mutatkozik meg. E módszer szerint azokat a változatokat nem kell megvizsgálni, amelyek mellett valamely $13\Delta a$ -nál kisebb réteg két fogásban lenne eltávolítva, hiszen $12\Delta a$ -ig az egy fogás az optimális. Ez tetemesen csökkenti a megvizsgálandó változatok számát. A módszer hasonló módon alkalmazható három, négy stb. fogás esetére is.

Az optimális fogásosztási probléma szigorubb matematikai tárgyalását a 3.1. függelékben adjuk meg.

Megfelelően kis Δa értékek esetében a módszer az igen nagy számú variáns miatt nagyon számításigényes. A számítások mennyisége csökkenthető, ha felhasználjuk azt a tapasztalatot, hogy az optimum rendszerint a megengedett legnagyobb fogásmélység környezetében van.

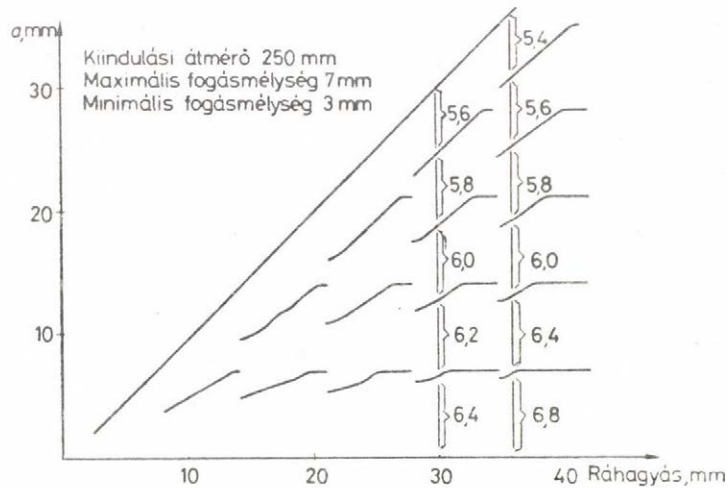
Az optimális fogásosztás meghatározásának ezt a módszerét a [3.9] és [3.10] munkák taglalják. A módszer alapján kidolgozott számítógépi program egy-egy esetre az optimális fogásosztást néhány perc alatt határozza meg. Ez a gyakorlati alkalmazások szémszögéből sok.

Ugyanez a program alkalmas viszont un. fogásosztási diagramok készítésére, amelyek különböző átmérők és ráhagyások esetére megadják az optimális fogásosztást, így egy-egy optimálás helyett tulajdonképpen széles feladatcsoportot old meg.

Ilyen fogásosztási diagramot mutat be a 3.5. ábra. Ha valamely konkrét ráhagyás értékhez függőlegest állítunk, azt a diagram az optimális fogásoknak megfelelő szakaszokra bontja.

Pl. ha $R = 30$ mm, akkor $a_1 = 6,4$; $a_2 = 6,2$; $a_3 = 6$; $a_4 = 5,8$ és $a_5 = 5,6$.

A fogásosztási diagramok hozzásegítenek megalapozott fogásosztási stratégiák kialakításához, s



3.5. ábra. Optimális fogásosztási diagram

ahhoz, hogy a korábban felvetett problémára - hogy ti. milyen messze vannak a heurisztikus szabályok által adott eredmények az optimumtól - választ adhassunk.

A 3.5. ábrán közölt diagram az adott esetben jól szemlélteti, hogy a gyakorlatban esztergáláskor jó fogásosztási stratégia lehet a ráhagyás egyenlő részekre osztása olyan módon, hogy az egyes fogások a lehető legnagyobbak legyenek a maximális fogásmélységen belül. Különböző más stratégiák szintén kiértékelhetők és az optimális változattal összehasonlíthatók.

Igy próbaszámításokat végeztünk: a/ az egyenlő legnagyobb fogásokkal /lásd fent/, b/ a maximális

megengedett fogásmélységekkel az utolsó fogásig, majd a fennmaradó rész eltávolításával és c/ a maximális fogásokkal az utolsó előtti fogásig, majd a fennmaradó rész kettéosztásával /ezt alkalmazza a FORTAP/.

Az eredmények függenek a ráhagyás nagyságától. Azonban általános következtetés gyanánt megállapítható volt, hogy az a/ és c/ esetek az optimális változathoz nagyon közeli költségeket eredményeznek, így gyakorlati alkalmazásuk indokolt. Még a b/ változat alkalmazása sem okoz drasztikus költségnövekedést.

Más fogásosztási stratégiák, például a fogásszám növelése, jelentős többletköltségekhez vezet.

3.4. A termelésirányítás és a technológiai tervezés szintjének kapcsolatai [3.2.]

A technológiai tervezés és termelésirányítás bonyolultsága elsősorban két problémából ered. Az egyik a technológiai tervezés és a termelésirányítás bonyolult kölcsönkapcsolata.

A termelésirányítás adja az alapvető impulzust a technológiai tervezésre, fogalmazza meg a gyártási feladatot, a tömegszerűséget, a határidőket, jelöli ki a terhelhető gyártási kapacitásokat. Másrészt viszont a termelésirányítás csak a technológiai tervezésből kaphatja a számára nélkülözhetetlen költség- és időadatokat, az anyag és a segédanyag fogyasztási normáit.

Új termék indításakor, a termeléstervezés fázisában ezek az adatok természetesen csak a rokon esetekre, előzményekre, tapasztalatokra, statisztikákra támaszkodó normatív jellegű adatok lehetnek. A megtervezett technológia birtokában a termelésütemezés és termelésprogramozás már pontos adatokkal operálhat.

Ha a technológiai tervezés eredményei nem elégitik ki a termelésirányítás céljait, akkor új kor-

látokat ír elő és újabb technológiai variánsokat kér.

Látható, hogy a termelésirányítás bemeneti adatokat szolgáltat a technológiai tervezésnek, de annak eredményei ugyancsak bemeneti adatként szolgálnak a termelésirányítás egyéb feladatainak megoldásához. Ez a többször váltakozó viszony okozza az egyik nehézséget.

A szintek közötti kapcsolat bonyolultságának másik oka, hogy magasabb szinteken valamely döntés vagy választás optimálásának pontos megítéléséhez olyan információkra, adatokra lenne szükség, amelyek akkor még nem állnak rendelkezésre, hiszen csak az alacsonyabb szinteken, tehát később képződnek. Ezért gyakran előfordulhat, hogy alacsonyabb szinteken a felsőbb szinten normatív jellegű adatok birtokában hozott döntések nem bizonyulnak optimálisnak. Ilyenkor vissza kell térni valamely magasabb szintre és meg kell ismételni egy-egy tervezési fázist. A tervezés tehát alapvetően iteratív jellegű.

Általánosságban is igaz, hogy a magasabb szinteken hozott döntések az alacsonyabb irányítási szintek számára feltételeket jelentenek. Különösen igaz ez az általunk vizsgált három termelésirányítási szint esetében. Az eggyel magasabb szint által kiadott

termelési feladattól való eltérés csak ott engedhető meg, ahol ez objektív szükségszerűség. Ilyen tényező lehet, ha a megfelelő alapanyag nem érkezett be, váratlanul új üzleti szempont jelentkezett vagy az előző szinten nem mértük fel pontosan a lehetőségeket és végrehajthatatlan termelési feladatot állítottunk elő. Az utóbbi eset gyakoriságát nyilván minimálisra kell szorítani, különben nem jól dolgoztuk ki a rendszereinket. Teljességgel kizárni azonban nem lehet, ugyanis a különböző szintek az egyes tényezőket nem vehetik ugyanolyan finomsággal figyelembe. Tervezéskor nyilván egy sokkal durvább kapacitásszámítás is megfelel, mint a napi programozáskor, amikor esetleg percnyi pontossággal kell számolni.

A termelésirányítási szintek esetében nemcsak az időtartam, hanem a kiterjedés is az egyik fontos jellemző. Nyilván nincs értelme beszélni egy műhely ötéves tervéről. Megfordítva is hasonló a helyzet. Nem értelmezhető egy vállalat egészének napi programozása egyetlen számítógépes rendszerként, mert az kezelhetetlen lenne. Ez azt jelenti, hogy egy magasabb szintű irányítási rendszerhez több párhuzamos, de egymással kommunikáló alacsonyabb szintű irányítási rendszer is tartozhat. A fent példaként említett végrehajthatatlan termelési feladat ezek egyikében jelentkezik. Ez azonban a magasabb szintek

révén befolyásolhatja a vele párhuzamos többi rendszert is.

A termelésirányítás szintjei nemcsak egymással, hanem a technológiai tervezéssel is szoros kapcsolatban állnak. A magasabb szintű irányítási döntések hatására alakulhat ki, hogy milyen technológiákat kell egy adott időszakban előnyben részesíteni. Attól függően, hogy a termelési kapacitások leterhelhetőek-e vagy sem, a minimális idejű vagy minimális költségű technológiát célszerű választani. Az előzetes kapacitásvizsgálatok alapján szükségessé válhat bizonyos megmunkálási módok mással való helyettesítése, ahol ez lehetséges stb. A technológiai tervezés alternatívákat ad, ami különösen a termelésprogramozás szintjén lehetővé teheti, hogy az aktualizált termelési feladatot végre lehessen hajtani még akkor is, ha a termelés előkészítése nem volt tökéletes. /Pl. ha egy szerszámfajta hiányzik, akkor az ezt nem használó technológiákat választjuk./

A szintek /ide értve a technológiai tervezést is/ kapcsolatai közvetve vagy közvetlenül valósulhatnak meg. A közvetett kapcsolatnak az a lényege, hogy a magasabb szinten egy bizonyos mértékig eleve számításba vesszük az alacsonyabb szint igényeit. A közvetlen kapcsolat akkor valósul meg, ha egy szinten a terme-

lési feladat végrehajthatatlan és ekkor vagy új termelési feladatot kell definiálni a magasabb szinten is, vagy a technológiai tervezéstől új variánsokat kell kérni. Ebben a folyamatban még hosszú ideig jelentős szerepe lesz az irányító szakembernek. Ő az, aki dönt, hogy az ellentmondást milyen irányban oldjuk fel, a magasabb szinthez milyen kérdés/eket intézzünk, mely termékcsoporthoz ismert technológiái nem kielégítőek. Ahhoz, hogy ezen a ponton az ember szerepét csökkentsük, még nagyon sok kutatásra van szükség.

Legbonyolultabb a technológiai tervezés és a termelésirányítás kapcsolata. Csábító gondolat, hogy a termelésirányítás szintjeit a technológiai tervezési szintek fölé helyezzük, s logikailag az igaz is, hiszen a technológiai tervezésre a parancsot, a tervezés korlátait és céljait a termelésirányítás adja. Azonban már a termeléstervezés szintjén sem ilyen egyszerű a helyzet, mert irreális feladatokat a gyártással szemben hiábavaló lenne megfogalmazni s a tervek realitását a technológiai tervezés tudja megítélni. A termelési tervet új gyártmány esetén vagy régi gyártmány gyártási feltételeinek változása esetén az irányítás és a tervezés több közelítő lépésben együttesen határozhatja meg.

Az előtervezés után a technológiai tervezés bizonyos fokig önállósul, bár a terhelhető erőforrások adatait a termelésirányítástól kapja meg. Ezek birtokában a technológiai tervezés önállóan folyik, a termelésütemezés és termelésprogramozás az erőforrások és terhelések egyensulya esetén a technológiázálással nem kerül közvetlen kapcsolatba.

A részleteiben is megtervezett technológia birtokában a termelésirányítás ezen két alsó szintje arról dönt, hogy a technológiai variánsok közül az adott körülmények között melyiket használja és azokat miként helyezze el időben és térben.

Az egyensuly felbontása esetén a termelésirányítás legfelső szintje más variánsok kidolgozását kéri a technológiai tervezés legmagasabb szintjétől. Az alacsonyabb szinteken a közvetlen kapcsolat csak akkor jön létre, ha a kívánt módosítás nem teszi szükségessé a gyártóberendezések és a fontosabb gyártóeszközök változtatását. Jellegzetes példa erre a célfüggvény olyan módosítása, amely a technológiai adatok változtatásával is követhető. Ebből a szempontból különösen kedvező az NC és AC szerszámgépek alkalmazása.

A termelésirányítás és a technológiai tervezés zavartalan együttműködéséhez nélkülözhetetlen a jól

definiált csatlakozási felület, amely közös és jól szervezett, folyamatosan karbantartott adatbázis segítségével valósítható meg. Különösen fontos, hogy a géppark állapota, terhelése, valamint a gyártó-eszközkészlet naprakész állapotban a technológiai tervezés rendelkezésére álljon.

A technológiai tervezési szintek kapcsolatainak összetettségét alapvetően az okozza, hogy bár az optimálás célfüggvénye és feltételrendszere minden szinten többé-kevésbé egzaktul megfogalmazható, magasabb szinteken gyakran nagyméretű feladatok adódnak és mindig hiányoznak a kiértékeléshez szükséges félig-meddig pontos adatok. Már korábban említettük, hogy ezek csak a tervezés alacsonyabb szintein válnak ismertté. Éppen ezért magasabb szinteken csak becsült értékek, rokonesetek adatai és a felgyülemlett tapasztalatok alapján dönthetünk. Ha az alsóbb szinteken kiderül, hogy a döntés téves volt, a korábbi tervezési feladatot meg kell ismételni. Ez viszont költséges és időigényes, ezért nélkülözhetetlen a megbízható normatívák, típus- és csoporttechnológiák használata.

Az is gyakran előfordul, hogy a felsőbb szintű döntés megvalósítása műszaki akadályokba ütközik. Ilyen esetnek minősíthető, amikor a készülékezés bonyolultsága, méretei miatt a korábban kiválasztott munkagép

kicsinek bizonyul, az elképzelt felszerszámozás ütközésekhez vezet vagy a többszerszámos művelet-
elemben a szerszámok egymással a technológiai
adatok szemszögéből inkompatibilisnak bizonyulnak.
Az iterációs lépések számának csökkentéséhez, azaz
a tervezés hatékonyságának növeléséhez e tekintet-
ben is előnyös a konkrét üzemi körülményekre adap-
tált típus- és csoporttechnológiák alkalmazása.

3.4.1. Egy integrált termelésprogramozási és technológiai tervezési rendszer és opti- málási problémái

A termelésirányítás és a technológiai tervezés
szintjeinek kapcsolatai, mint az előzőekben taglal-
tuk, bonyolultak.

Az egész termelési rendszer gazdaságos, haté-
kony működése szempontjából kulcsfontosságú, hogy
hogyan oldjuk meg, kapcsolataikban, a felmerülő ter-
vezési problémákat.

Mint az előzőekben vázoltuk, a követelmények
szerteágazóak és teljesítésükre a mindenkori körülmények
lényeges hatással vannak. Ennek során az em-
beri intuiciónélkülözhetetlen és heurisztikus mód-
szereknek, iteratív megoldásoknak széles tere van.

Azonban a tervezési módszerek fejlődésével a folyamatok egyre nagyobb része válik formalizálhatóvá. A szinteken belüli és a szintek közötti folyamatok leírásával és az ezekre megfogalmazott problémák megoldásával az egész rendszer működésének optimálása felé jelentős lépések tehetők.

A következőkben a termelésprogramozási és a technológiai tervezési szintek néhány kapcsolatát próbáljuk megfogalmazni és ennek alapján integrált rendszer létrehozására teszünk javaslatot, amely számítógépen realizálható.

A termelésprogramozás feladatának megoldásához a következő adatok szükségesek:

- homogén termelőkapacitások adatai;
- az adott napra vagy műszakra az alkatrészrendelésállomány adatai;
- a technológiát leíró műveleti törzsadatok.

Az első két adatcsoportot a termelésirányítás magasabb hierarchikus szintjei nyújtják. Ezek jól definiálhatók és a termelésprogramozási szintnek könnyen átadhatók.

Komoly nehézséget jelent viszont a műveleti törzsadatok előállítása, kezelése. A technológiai tervezés által nyújtott adattömeg összeállítása,

kódolása, kiválasztása, a termelésprogramozási rendszerbe való beépítése, frissítése, karbantartása stb. hatalmas, sok hibalehetőségű munka. Olyan korszerű körülmények között, amelyek például az integrált gyártórendszerek hatékony működéséhez elengedhetetlenek, a fenti feladat automatizálható.

Feltételezve, hogy a technológiai tervezés feladatát kisebb, vagy nagyobb fejlettségi szintű számítógépes rendszer végzi, ennek eredményeiből automatikusan képezhetőek a termelésprogramozás számára szükséges műveleti törzsadatok.

A szükséges adat- és programműveleteket megfelelően kialakított adatbázisrendszer végezheti el. Az ilyen rendszer működése a legnagyobb vonalakban a következő: a rendszer adatbázisa tartalmazza az alkatrészek valamely halmazának műveleti törzsadatait. Ezek a korábban megoldott technológiai tervezések eredményeiből alakultak ki. Amikor az alkatrész rendelésállomány ismeretessé válik, a rendszer megvizsgálja, hogy rendelkezésre állnak-e a műveleti törzsadatok.

Negatív esetben technológiai tervezést kezdeményez, amelynek eredményei szolgáltatják a kívánt adatokat. Ezek az adatok a későbbiekben kész eredmények gyanánt rendelkezésre állhatnak.

A jelen értekezés szerzőjének kezdeményezésére és irányításával az MTA SZTAKI és a BME szakemberei /Nagy Judit, Szelke Erzsébet, Kranczler Mária, Mészáros Imre,

Mohácsi Béla, dr. Szántai Tamás/ integrált számítógépes rendszert dolgoztak ki a fent vázolt feladat megoldására.

Pontosabban, a kidolgozott rendszer annyiban tulmutat a fent foglaltakon, hogy az egész rendszer optimálásához való közelítés céljából alkalmazza az értekezésben vázolt másodlagos optimálási módszert, valamint egyéb heurisztikus eljárásokat, amelyek a technológiai adatok manipulálásával lehetővé teszik termelésirányítási célok realizálását.

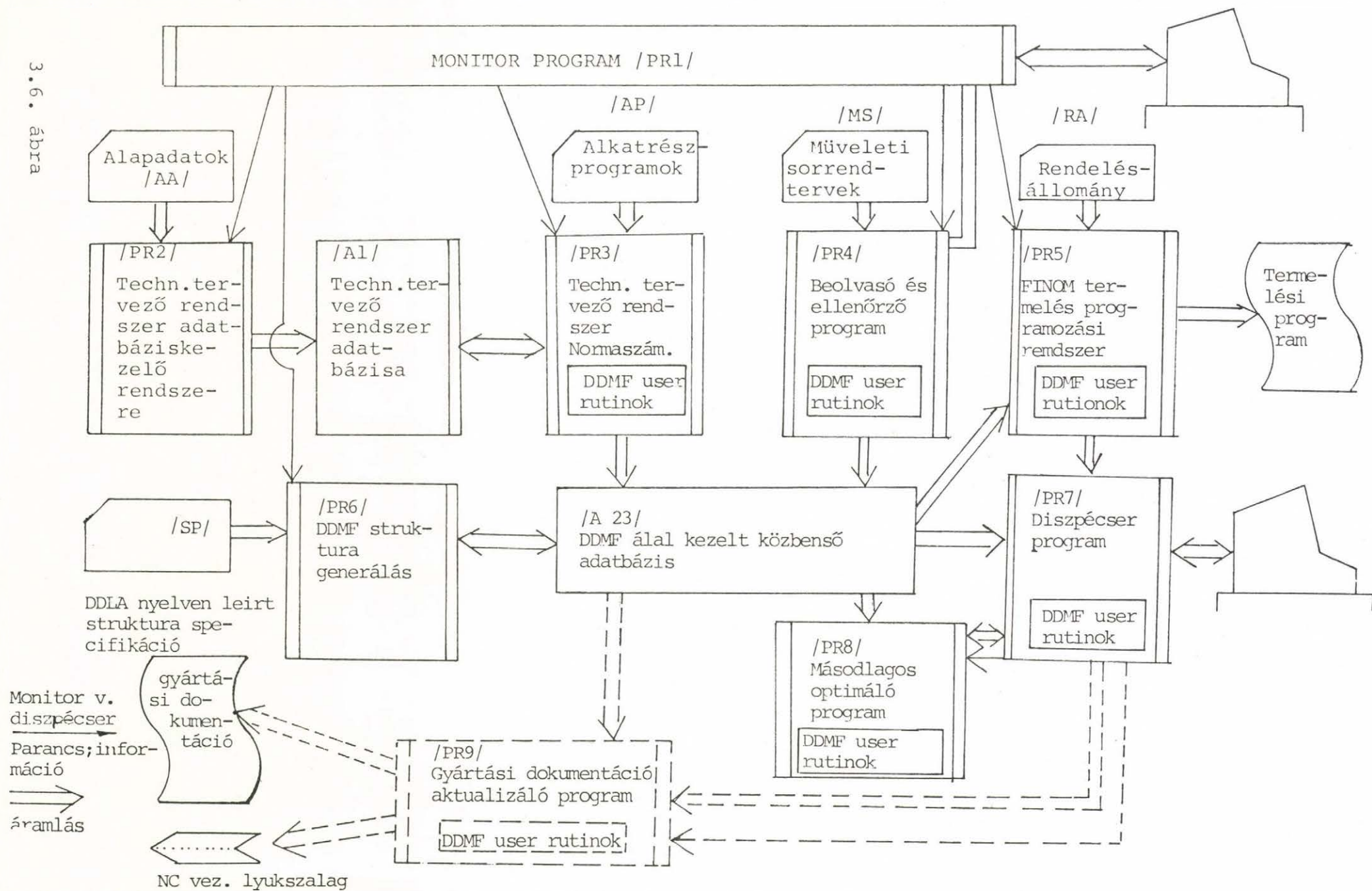
A termelési program összeállítása az elsődleges optimálás eredményeire támaszkodhat. Visszahivatkozva a másodlagos optimálási módszer leírásakor foglaltakra nyilvánvaló, hogy a termelési program készen nyújtja a másodlagos optimálás számára a követelményeket. Ezek: az új /a minimális költséget eredményezőknél kisebb/ megmunkálási idők, az erősen leterhelt homogén gépcsoportokra; más esetben a kevésbé terhelt gépeken rendelkezésre álló idő, vagy a szerszámra vonatkozó feltételekből adódó követelmények.

Az integrált rendszert az MTA SZTAKI-ban kidolgozott FINOM elnevezésű termelésprogramozási rendszer, a BME Gépgyártástechnológiai Tanszéken kifejlesztett technológiai tervezőrendszer összeépítésével valósították meg. Az összeépített rend-

szerek közös adatmezőt használnak. A közös adatmezőt CODASYL alapú adatbáziskezelő-rendszer, a DDMF /IDOS-származék/ kezeli. Az összeépítéskor meghagyták a technológiai tervező rendszer saját adatbázisát, valamint adatbáziskezelő-rendszerét. A rendszerek értelmes együttműködése érdekében a következő új programok megírása vált szükségessé:

- monitor program,
- diszpécser program,
- műveleti sorrendet beolvasó és ellenőrző program,
- DDMF strukturageneráló program.

A rendszer felépítését a 3.6. ábra szemlélteti. Működésének leírása a [3.11] kutatási jelentésben található meg. /Az ábrán látható programjelölések - például: PR2, A1, PR3 stb. - a részletes leírás hivatkozásait jelzik./



4. Forgácsolási folyamatok visszacsatolt rendszerei /technológiai AC/ és optimalizálási problémáik.

A 2. részben kifejtettük, hogy a forgácsolási folyamatok általában sztohasztikus körülmények között zajlanak le. Ennek ellenére a determinisztikus modellek alapján kialakított megmunkálási stratégiák és az ezek alapján számított optimális forgácsolási adatok sok gyakorlati esetben jól alkalmazhatók. Ennek oka, hogy az esetek jelentős hányadában a zavarások nem befolyásolják lényegesen a forgácsolási folyamat legfontosabb jellemzőit.

Más esetekben azonban a zavarások - az anyagminőség, a ráhagyás, a szerszám és a gép állapotának stb. változása - a megmunkálási folyamat lényeges, meghatározó tényezőivé válnak. Ekkor a determinisztikus modell csak a legrosszabb körülményeket feltételezve alkalmazható, ami kedvezőbb esetekben a kapacitások kihasználatlanságához vezet. Valamivel jobb a helyzet, ha avéletlenszerű jelenségeket is tekintetbe vevő sztohasztikus modellt alkalmaznak. Ez lehetővé teszi, hogy a feleslegesen nagy biztonsággal való megmunkálás helyett intenzívebb, ésszerű kockázatot vállaló forgácsolási adatokat alkalmazzanak. Ennek az elvi lehetőségnek a kihasználása azonban a determinisztikus modell ismeretén túlmenően további jelentős információs igényeket támaszt és számítástechnikai nehézségekkel jár.

A továbbblépés utja nem a létező berendezések alkalmazásának a további finomítása, hanem olyan megmunkáló berendezések építése, amelyek alkalmasak arra, hogy erősen változó körülmények között is kedvező működési sajátosságokkal rendelkezzenek. Változó körülmények között zajló, jelentős zavarásoknak kitett folyamatok irányításának leghatásosabb eszköze a visszacsatolás elvének alkalmazása. Ekkor az irányító berendezés információt kap a megmunkálási folyamatról /visszacsatolás/, ezt összehasonlítja a folyamattól megkívánt jellemzőkkel és az eredmény alapján olyan irányító hatást gyakorol, hogy a valóságos állapotot a megkívánt állapothoz közelítse.

A szerszámgépes terminológia azokat a berendezéseket, amelyek a megmunkálási folyamat jellemzőinek a visszacsatolásával működnek, adaptív irányítási rendszereknek nevezi. Ez a meghatározás tulajdonképpen helytelen, mert ezek a rendszerek irányítástechnikai fogalmak szerint többségükben "egyszerű" szabályozási rendszerek. Természetesen előfordulnak a szerszámgép-irányításban olyan berendezések is, amelyek szabályozástechnikai fogalmak szerint is adaptív rendszereknek tekinthetők.

A hagyományos szerszámgépeken való megmunkáláskor az üzemeltető szakember látja el az irányító tevékenység valamennyi feladatát. Nevezetesen a véletlenszerű

változások hatását olyan beavatkozással küszöböli ki, amelyet a forgácsolási folyamat általa megfigyelhető jellemzőiből /a ráhagyás alakja és mérete, a forgács alakja, felületminőség, rezgések, hang stb./ határoz meg.

Az adaptív irányítás olyan műszaki tökéletesítést valósít meg, amely hagyományos módon megvalósíthatatlan, mert a dolgozónak nincs mennyiségi információja a forgácsolást jellemző tényezők /pl. a forgácsolóerő, a teljesítmény változásáról és pillanatnyi értékéről vagy a szabályozás olyan feladatokat róna rá, amelyek az emberi képességek korlátait meghaladják, pl. állandó, folytonos beavatkozás vagy a beavatkozással kapcsolatos gyorsasági követelmények/. Bár az adaptív irányítás jelentősége nem lekicsinyelhető hagyományos szerzőgépek esetében sem, hangsúlyozni kell, hogy ezek alkalmazásakor az irányítás feladatának jelentős részét az ember látja el, aki a körülmények igen széles határok között való lassu változásakor képes a megfelelő irányító tevékenységre.

A megmunkálási folyamat automatizálásakor a törekvés - a termelékenység növelése mellett - az emberi beavatkozás csökkentése. Az optimálás a nagyértékű automatizált termelőberendezések kihasználásának egyik fontos tényezőjévé válik.

A korszerű NC-berendezések alkalmazásakor a munkadarab alakjának, méretének kialakításához szükséges fő- és mellékmozgásokat a szerszámgép automatikusan hajtja végre. Nem lehet azonban az ember tevékenységét teljesen kiküszöbölni a megmunkálási folyamat irányításából. A technológiai adatokat a program automatikusan állítja be, azonban a változó megmunkálási körülmények szükségessé tehetik az emberi beavatkozást, amire az NC-irányító berendezések módot nyújtanak /az előtolás felülbírálása, programrészek kihagyása, a gép megállítása stb./.

Az adaptív irányítás kettős feladatot lát el: egyrészt az optimális viszonyokhoz való közelítést változó körülmények esetében, másrészt az emberi tevékenység egyre nagyobb mérvű kiküszöbölését a megmunkálási folyamat közvetlen irányításából.

A megmunkálási folyamat szabályozása tulajdonképpen az optimális stratégiák kialakítására való törekvés logikus folytatása. Ez az alapgondolat szerepel összefoglaló kapocsként a megmunkálási folyamatokat irányító rendszereknek a következő pontokban való ismertetésekor.

4.1. A forgácsolási folyamat szabályozása

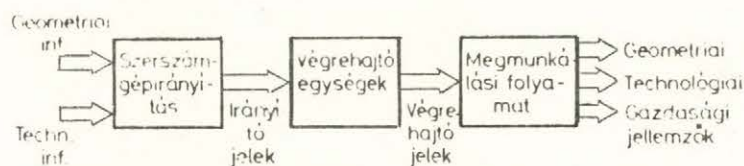
A hagyományos szerszámgépvezérlő berendezések, közéjük értve a számjegyes vezérlőberendezéseket is, a forgácsolási folyamat szemszögéből "vakon" működnek, vagyis

nyílt hatásláncuak. Valamely program alapján vezérlik a szerszámgép egyes egységeinek működését, megvalósítják az elemek mozgásának a programban előírt pályáit, gondoskodnak a mindenkori célhelyzethe való küldéséről, beállítják a mozgások előírt sebességét, összehangolják a különböző szerkezeti elemek működését.

A rendszerekben lehetnek visszacsatolások, ezek azonban csak arról adnak információkat, hogy a szerkezeti egység vezérelt pontja elérte-e a programban előírt célhelyzetet. Ezek a vezérlőrendszerek a forgácsolási folyamatot közvetlenül nem irányítják, hiszen a folyamat állapotáról, optimális vagy attól eltérő voltáról, az alkatrészek méretéről, alakjáról, érdességéről, a szerszám forgácsolóképességéről és kopásáról az irányítórendszer információt általában nem kap. A körülmények változásától függetlenül a vezérlés mindig ugyanugy, tehát vakon valósítja meg a programot. Ennek eredményeként a szerszám az alkatrészhez viszonyítva nem az előírt pálya mentén mozog, a szerszám csucsa nem a kívánt helyzetet foglalja el, a különböző deformációk, a kopás és beállítási hibák átmásolódnak az alkatrészre. Az irányítási rendszer nem reagál a körülmények változására, sem a részleges terhelésre, sem a túlterhelésre, így az intenzitás hol alacsonyabb az optimálisnál, hol nagyobb a megengedhetőnél

is. Az utóbbi esetben a túlterhelés mértéke olyan nagymérvű lehet, hogy szerszámtörést, géptörést, selejtet, balesetet okozhat. A hagyományos irányítási rendszerek működését a 4.1. ábra szemlélteti.

A szovjet Balaksin professzor érdeme, hogy felhívta a figyelmet e jelenség abszurd és tarthatatlan voltára, arra ugyanis, hogy az igen drága - sokszor több millió forint értékű - szerszámgépek, amelyeken igen pontos és sokszor nagyon drága, selejt esetén nehezen pótolható alkatrészeket munkálunk meg, semmiféle adaptációs készséggel nem rendelkeznek, a folyamatról információkat nem gyűjtenek, a változó körülményekhez nem alkalmazkodnak akkor, amikor sokkal egyszerűbb eszközökbe, gépekbe ma már sok esetben adaptív sajátosságokat építenek be. Elsőként javasolta, hogy a hagyományos szerszámgépvezérléseket egészítsék ki olyan szabályozó berendezésekkel, amelyek képesek mérni a forgácsolási folyamat legfontosabb jellemzőit és be tudnak avatkozni a folyamatba úgy, hogy a körülmények változása esetén is a megkívánt szinten tartsák a mért jellemző értékét. Elsőként építették meg szerszámgépeken ilyen szabályozó berendezések kísérleti példányait is.



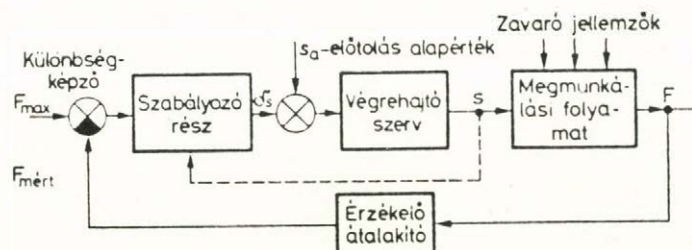
4.1. ábra. Hagományos irányítási rendszerek

Balaksin professzor gondolatmenete a következő volt: a fogásmélység, a keménység, a merevség változása, a szerszám kopása észlelhető a forgácsolóerő komponenseinek, a forgácsolási teljesítménynek, a szerszámmra ható forgatónyomatéknak, vagy a rendszerben fellépő rugalmas deformációknak a változásából. Ezek egyuttal jól jellemzik a forgácsolási folyamat állapotát is. Építsünk be tehát az MKGS-rendszer valamely elemébe olyan érzékelőket, amelyek alkalmasak egy vagy több jellemző mérésére, ily módon állandóan információt kapunk a folyamat mindenkori állapotáról. Másrészt e jellemzők értéke szabályozható a forgácsolási paraméterek - a fogásmélység, az előtolás, a tárgysebesség, a szerszámsebesség - módosításával. Megfelelő szabályozókör beépítésével olyan rendszert kapunk, amely most már valóban a forgácsolási folyamatot irányítja. Az ilyen rendszer a következőképpen működik.

A rendszer matematikai modellje vagy más megbízható ismeretek alapján meghatározzák a forgácsolási folyamatot jellemző tényező /forgácsolóerő vagy komponensei, teljesítmény, forgatónyomaték stb./ megkivánt értékét. Ezt /vagy ezeket/ alapjelként a rendszerbe tápláljuk. A forgácsolást valamilyen előre megadott, biztonságos technológiai adatokkal kezdjük meg.

Mérjük a szabályozott jellemző /erő, nyomaték vagy teljesítmény/ értékét és azt összehasonlítjuk az alapjellel. A szabályozó rendszer a különbség alapján olyan jelet képez, amely a végrehajtó szervnek a megfelelő forgácsolási paraméter /pl. az előtolás/ módosítására olyanképpen ad utasítást, hogy ez a különbség csökkenjen. Ha pl. a ráhagyás vagy a keménység csökkenése folytán a forgácsolóerő csökken, a rendszer addig növeli az előtolást, amíg az erő újból el nem éri a programozott értéket. A forgácsolóerő növekedésére az irányítórendszer az előtolás csökkenésével reagál.

A 4.2. ábrán olyan szabályozó kört mutatunk be, amelyben az erő a szabályozott jellemző. Az ilyen visszacsatolt, tehát szabályozási rendszerek megjelenési formája a legkülönbözőbb lehet. A szabályozott jellemző a forgácsolóerő, a teljesítmény, nyomaték mellett lehet a forgácsolás hőmérséklete, a szerszám kopása, az alkatrész mérete, felületi érdessége és egy sor más mennyiség is.



4.2. ábra. A forgácsolóerő szabályozása

A szerszámgépek adaptív irányítási rendszereinek közös tulajdonsága, hogy mérik a forgácsolási folyamat valamely jellemzőjét vagy jellemzőit, és a mért értéket visszacsatolással a folyamat irányítására használják fel.

A megvalósított rendszereket egyszerű szabályozási feladatokat megoldó körök kombinációja alkotja. Szabályozástechnikai fogalmak szerint e rendszerek többsége mint említettük, visszacsatolt, de nem adaptív rendszer. A továbbiakban mégis mi is ezt a szerszámgép-es gyakorlatban elterjedt megnevezést fogjuk alkalmazni. A nemzetközi és hazai gyakorlatban egyaránt elterjedt e rendszerekre az AC-rendszer elnevezés, amely az angol Adaptive Control szavak rövidítéséből ered. A magyar szakirodalomban az alkalmazkodó vezérlés megnevezés is előfordul.

Az adaptív irányítási rendszereket többféleképpen szokás osztályozni. Az egyik gyakori osztályozási szempont a szabályozott jellemző jellege. Amikor a forgácsolási folyamat technológiai jellemzőit /forgácsolóerő, teljesítmény, nyomaték, kopás, hőmérséklet stb./ használják fel visszacsatolási információ gyanánt, rendszerint a technológiai AC-rendszer meghatározást alkalmazzák.

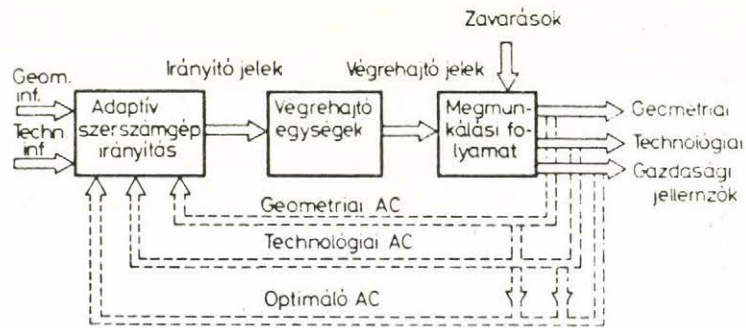
Ha megmunkálás közben a munkadarab valamely minőségi jellemzőjét /méret, alak, felületi érdesség/ mérik és az így nyert jeleket használják fel a folyamat szabályozására, geometriai AC-rendszerekről szokás beszélni. Ez az osztályozás természetesen igen feltételes. A Balaksin professzor vezette szovjet iskola, amely az adaptív szerszámgépirányítás uttörője, igazolta, hogy a technológiai AC-rendszerek, különösen, ha a forgácsolóerőt állandósítják, jelentősen javítják a megmunkálás pontosságát és felületi érdességét is.

A másik osztályozási szempont az AC-rendszer optimalizáló képessége. Azokat a rendszereket, amelyek a technológiai adatokat úgy változtatják, hogy a szabályozott megmunkálási jellemző /erő, teljesítmény stb./ értéke állandó legyen, értéktartó adaptív rendszereknek, vagy angol rövidítéssel ACC- /Adaptive Control Constraint/ rendszereknek nevezik /az alkalmazott elnevezés nem az angol nyelvű szó szerinti fordítása/.

Az olyan rendszereket, amelyek a megmunkálás jellemzői mellett gazdasági információkat - megmunkálási költség, megmunkálási idő - is felhasználnak és a folyamatot úgy szabályozzák, hogy a célfüggvényben megfogalmazott gazdasági mutatók a legkedvezőbbben alakuljanak, optimáló adaptív rendszereknek, vagy angol rövi-

ditéssel ACO- /Adaptive Control Optimization/ rendszereknek nevezik. Ez utóbbiak szabályozástechnikai fogalmak szerint is adaptív rendszerek.

Az adaptív irányítási rendszerek osztályozását a 4.3. ábra szemlélteti.



4.3. ábra. Adaptív irányítási rendszerek



4.4. ábra. Értéktartó (ACC-) adaptív irányítási rendszer

Az ACC-rendszerek felépítését és működési elvét a 4.4. ábra mutatja be. Az ábrán jól látható, hogy az adaptív szabályozás kiegészíti a hagyományos szerszámgépvezérlést. A szerszámpályákat, a sebességek alapértékeit a hagyományos vezérlőrendszer határozza meg a geometriai /célhelyzetek, pályaelemek/ és kapcsolási /előtolási, fordulatszám, hűtés stb./ információk alapján. Rendszerint a módosított jellemzők /előtolás, fordulatszám stb./ változtatásának megengedett határai is szerepelnek a programban. Jól látható az is, hogy az adaptív irányító rész módosító jeleket generál, amelyek összegződnek a programból kapott értékekkel. Az adaptív irányító rész a szabályozott jellemző megkívánt értékét kívülről, programban kapja meg. Elvileg nem különbözik ettől a rendszertől az olyan, amelyben az alapjel nem állandó, hanem megadott törvényszerűség szerint /valamilyen mennyiség, például a szerszámelmozdulás függvényében/ "lassan" változik. Hasonló módon, bár a 4.4. ábrán ezt nem tüntettük fel, egynél több mennyiség is lehet szabályozott jellemző.

Az ACO-rendszerek szintén visszacsatolt rendszerek, de egy szempontból lényegesen különböznek az "egyszerű" visszacsatolt rendszerektől, és pedig abban, hogy működésükben megtalálhatók az identifikáció és az optimalás jellemző műveletei.

A 2. rész bemutatta, hogy a megmunkálási folyamat matematikai modelljének ismeretében hogyan határozhatók meg az optimális technológiai adatok. Amikor a folyamatot véletlenszerű zavarások érik, az ismerttetett módszerek csak azért nem alkalmazhatók, mert ismeretlenek a modellekben szereplő mennyiségek értékei. Kézenfekvő, bár egyáltalán nem egyszerű megoldás az, hogy a folyamat jellemző mennyiségeit /ráhagyás, anyagkeménység, hőmérséklet a forgácsolási zónában stb./ mérési eredményekből, közvetlenül vagy közvetve kiértékeljük - ezt a műveletet nevezik általában identifikációnak - és a kiértékelte mennyiségekkel végezzük el az optimálást.

Vizsgáljuk például azt az esetet, amikor a forgácsolóerő /vagy valamelyik komponense/ a mért mennyiség. A forgácsolóerő meghatározására szolgáló képletből kifejezhető a fogásmélység, vagy az anyagkeménységet is jellemző állandó.

Mivel

$$F = C_F s^{y_F} a^{x_F} v^{z_F},$$

így

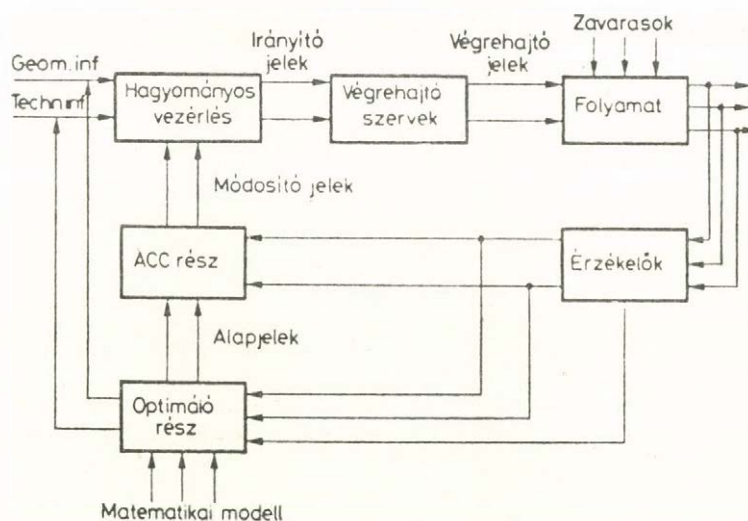
$$a = \left(\frac{F}{C_F s^{y_F} v^{z_F}} \right)^{\frac{1}{x_F}},$$

vagy

$$C_F = \frac{F}{\frac{y_F}{s} \frac{x_F}{a} \frac{z_F}{v}},$$

A szóban forgó mennyiségek meghatározására felhasználhatóak az identifikáció tudományágának bőségesen rendelkezésre álló eredményei és ezek számítógépes vetületei. Ezen belül a kísérlettervezés, a szűréselmélet és számos más diszciplína szakismeretei bőségesen kamatoztathatóak.

Az optimáló adaptív irányítást célszerű kombinálni az értéktartó szabályozással. A matematikai modellben gondolkodva ez azt jelenti, hogy az utóbbi gondoskodik a biztonságos forgácsolásról, vagyis arról, hogy a technológiai adatok a megengedett tartományban legyenek. Az értéktartó szabályozások működését egy magasabb szint - az optimáló rész - irányítja, amely megvalósítja a mindenkori körülményeknek megfelelően az optimális viszonyokhoz való közelítést.



4.5. ábra. Optimáló (ACO-) adaptív irányítási rendszer

Az ACO-rendszerek felépítését és működését a 4.5. ábrán mutatjuk be vázlatosan és egyszerűsítés kedvéért kissé önkényes tagolásban. Az ACC-rendszerrel szemben két feltűnő eltérést észlelhetünk. Az egyik eltérés a rendszer felépítésében mutatkozik: az adaptív irányítás optimálórészével egészül ki. A másik változás a rendszer működési módjában mutatkozik. Az ACC-rész a szabályozott jellemző megkívánt értékét nem kívülről programban, hanem az optimálórésztől kapja. Az optimálórész a hagyományos vezérlés programját is módosíthatja; megváltoztatja az előtolás és fordulatszám alapértékeit, új ráhagyás-leválasztási tervet dolgozhat ki és ennek megfelelően módosíthatja a szerszám pályákat stb. Az ACC és az optimálórész között sajátos munkamegosztás alakul ki. A folyamatot közvetlenül az ACC-rész szabályozza. Ez a rész azonnal reagál a megmunkálási körülmények /anyagkeménység, ráhagyás, forgácsolóképeség stb./ gyors változásaira. Garantálja a biztonságos forgácsolást, a gép megfelelő leterhelését, a kedvező forgácsolási viszonyokat stb.

Az optimálórész az ACC-résznél lassabb működésű. Amikor erre szükség van, újra és újra elvégzi lehetőség esetén az identifikálást, majd az optimálást és

ennek eredményeként módosítja az ACC-rész alapjeleit, esetleg a hagyományos vezérlés programját is. Az optimáló rész működésének eredményei tehát a hagyományos vezérlés és az ACC-rész révén realizálódnak. Az optimáló részbe a folyamatról ugyanazok a jelek is befutnak, amelyeket az ACC-rész is fogad, de egyéb információkat is feldolgozhat /pl. szerszámkopás/.

Fontos elvi különbség az ACO- és egyéb rendszerek között az, hogy az ACO nem konkrét technológiai jellemzőket, hanem az optimáláshoz szükséges matematikai modelleket /feltételrendszerek, célfüggvények, kopásösszefüggések/ és ezek paramétereit, esetenként az előgyártmány és a gyártandó alkatrész geometriai leírását stb. kapja meg bemenő információként.

Az ACO-val kiegészített szerszámgépirányítási rendszer működése a következőképpen jellemezhető:

- A megmunkálás a hagyományos vezérlés irányítása alatt indul az előre kidolgozott program szerint, az adaptív irányító részt bekapcsoljuk;
- Az ACC-irányító rész szabályozza a folyamatot, a szabályozott jellemzők alapértékeinek megfelelően változtatja a módosított jellemzők értékét és korrigálja a folyamat kisebb eltéréseit;

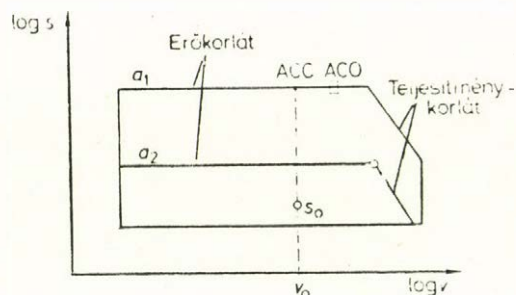
- Az optimálórész folyamatosan felügyel. Amikor a folyamat oly mértékben eltér az optimálistól, hogy azt már az ACC nem tudja korrigálni, elvégzi az optimálórész az optimálási feladatot és kiadja az ACC-nek a szabályozott jellemzők új alapértékeit, valamint módosítja a hagyományos vezérlőrész programját;
- A folyamat a hagyományos vezérlőrész és az ACC irányítása alatt folytatódik a módosított irányítási adatoknak megfelelően addig, amíg az optimálórész újból be nem avatkozik.

A leírtak természetesen egyszerűsítve tükrözik a rendszer működését. Más működési mód is lehetséges. Előfordul az is, hogy a hagyományos vezérlőrész nem, vagy alig kap a programban technológiai információkat, s azokat a folyamat kezdetén is az optimálórész generálja. Feltételes ebben a rendszerben az ACC elnevezés is, hiszen az alapjel értéke változik, esetenként folyamatosan. A valóságban az ACC és az optimálórész általában nem különül el egymástól olyan élesen, mint azt az ábrán bemutattuk.

Az ACC- és ACO-rendszerek közötti különbség egyszerű példával szemléltethető. Tételizzük fel, hogy hengeres felületet esztergálunk s az előgyártmány mérete vagy keménysége jelentősen változik darabról darabra, vagy egy darab forgácsolása során.

ACC-rendszer esetében a megmunkálás valamely előre meghatározott előtolással és fordulatszámmal indul, majd az előtolás addig változik, amíg a szabályozott jellemző el nem éri a programban megadott értéket. Ezután az előtolás a pillanatnyi feltételeknek megfelelően hol nő, hol csökken, s így a szabályozott jellemző /erő, nyomaték, vagy teljesítmény/ programozott értéke körül marad. ACO-rendszer esetében a megmunkálás ugyanugy indul, de másként folytatódik. Az irányító rendszer a forgácsoló erő /nyomaték, teljesítmény stb./ mért értéke alapján meghatározza az anyagkeménység, a fogásmélység stb. együttes kihatását. Ebből bizonyos esetekben kiértékelhetővé válik a mindenkori pillanatnyi körülményeknek megfelelő éltartam, meghatározhatók a feltételrendszer és a célfüggvény összetevői. Az optimalizáló rész a második fejezetben ismertetett módszerrel kiszámítja az optimális technológiai adatokat, majd utasítást ad ezek meghatározott módon való beállítására. Ha mód van a szerszámkopás közvetlen mérésére, akkor a számított adatok mért értékkel helyettesíthetők.

A kétféle irányítási mód közötti különbséget a 4.6. ábra szemlélteti.



4.6. ábra. ACC és ACO-rendszerek működésének összehasonlítása

Használjuk fel a 2. részben vizsgált példát. Az ott kapott eredményeket a 2.1. táblázat és a 2.16. ábra szemléltette. Tételezzük fel, hogy a munkadarab ráhagyása 1 és 5 mm határok között változhat. Adaptív irányítás hiányában a legrosszabb esetre számított, a 4.6. ábrán 0-val jelölt adatok alkalmazhatók. Ugyanezt a forgácsolósebességet alkalmazva az ACC-rendszer az x-szel, az ACO-rendszer a \square -tel jelölt munkapontokat adja.

Az ACC-rendszer működése gyors, és így gondoskodik a megmunkálás biztonságos lefolyásáról is. Az optimálító rész által generált folyamatok lassabbak. Ez a rész gondoskodik arról, hogy a megmunkálás tartósan ne folyhasson gazdaságtalan módon. Az ACO-rendszerek kialakításáról a későbbiekben részletesen lesz szó.

A leírtakból kiderül az ACO-rendszernek a technológiai tervezés, a szerszámgép programozás egyszerűsödésében megmutatkozó egyik fontos előnye is. A programozó technológus vagy a számítógépes programozási rendszer lényegében mentesül a technológiai adatok meghatározásának feladata alól.

4.2. Adaptív irányítási stratégiák

Az adaptív rendszerek legfontosabb jellemzője az irányítási stratégia. Ez a kifejezés összetett fogalmat takar, amelybe beletartozik az AC-rendszer által elérendő cél és mód is, ahogyan a kitűzött célt megvalósítják, tehát a szabályozott és módosított jellemző megválasztása, több szabályozóköör alkalmazása esetén a körök működésének összehangolása.

Az irányítási stratégiákat célszerű külön az ACC- és külön az ACO-rendszerekre elemezni.

4.2.1. Egyszerű ACC-rendszerek

Vizsgáljuk meg először az adaptív szerszámgép-irányítás leggyakoribb alkalmazási esetét, mikor a forgácsolóerő, a forgácsolási teljesítmény vagy a forgatónyomaték értékét az előtolás szabályozásával

állandósítják a megengedett legnagyobb értéken. Az előtolás szabályozását az is elősegíti, hogy a szerszámgépeken /különösen a pályavezérlésű NC-szerszámgépeken/ a fokozatmentes előtolás jól megvalósítható.

A 4.2. ábrán már bemutattuk az előtolást szabályozó ACC-rendszer tömbvázlatát. Megfelelő értékelők mérik a forgácsolási folyamat valamely jellemzőjét. Az adaptív irányító rész a mért értéket /vagy valamely ebből képzett mennyiséget/összehasonlítja a jellemző megengedett értékével, majd az összehasonlítás eredménye alapján módosítja az előtolást.

Legyen például az alapjel a forgácsolóerő /vagy valamely komponensének/ megengedett F_{\max} értéke. A szabályozó kör feladata az F erő /szabályozott jellemző/ értékének ezen az állandó szinten tartása. Az F_{\max} és a mért F értékek összehasonlításával megkapjuk a szabályozási eltérést $\delta F = F_{\max} - F_{\text{mért}}$, amelynek alapján a szabályozó rész - esetleg az előtolás értékét is figyelembe véve - rendelkező jelet ad ki az előtolás /módosított jellemző/ változtatására. A végrehajtó szerv /előtoló motor/ e jelnek megfelelően változtatja az előtolást - ami az erő megváltozását idézi elő - egészen addig, amíg annak nagysága újból el nem éri a megadott értékét.

Tételezzük fel, hogy a rendszerben csak a megmunkálendő alkatrész fogásmélysége változik. Amikor a fogásmélység a_1 értékű, állandósult állapotban az előtolás

$$s_1 = \left(\frac{F_{\max}}{C_F a_1} \right)^{\frac{1}{Y_F}},$$

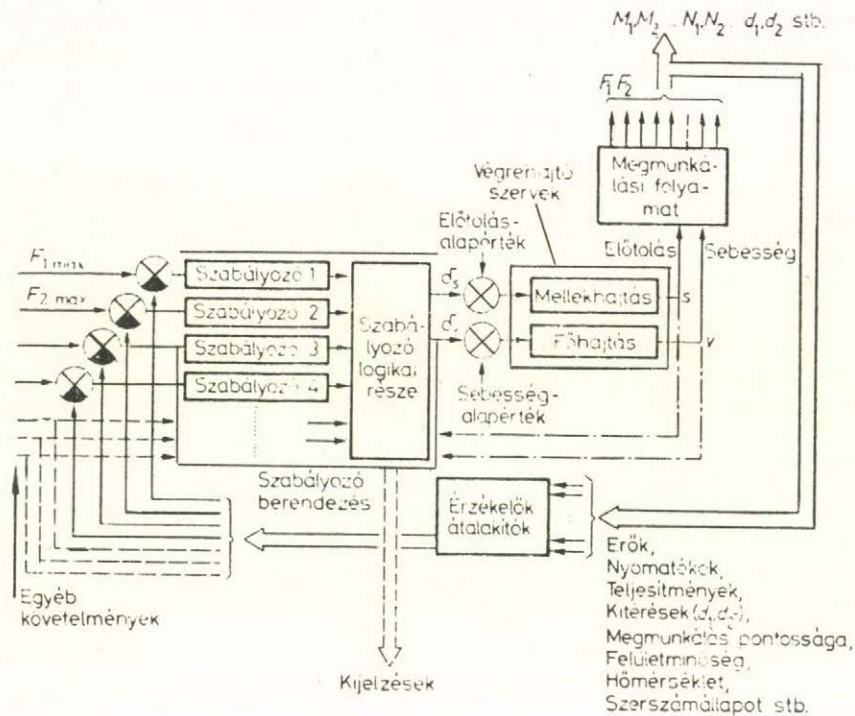
míg ha a fogásmélység a_2 értékű

$$s_2 = \left(\frac{F_{\max}}{C_F a_2} \right)^{\frac{1}{Y_F}}.$$

Ezeket a szabályozási rendszer automatikusan állítja be. Emlékeztetünk azonban arra, hogy a korlátértékek és a legcélszerűbb forgácsolási sebesség meghatározása korántsem egyszerű feladat.

4.2.2. Több szabályozó körös ACC-rendszerek

Bonyolultabb ACC-rendszerek alakulnak ki, ha az irányítórendszerbe nem egy, hanem több szabályozókört építenek be. Ilyen példát mutatunk be a 4.7. ábrán. Ilyenek lehetnek a különböző erők, deformációk, nyomatékok, teljesítmények, a hajtások áramerősségei, az alkatrész mérete, érdessége, a hőmérséklet a megmunkálás zónájában stb. Ezek közül egyesekre adottak lehetnek a megengedett legnagyobb értékek.



4.7. ábra. Több szabályozókörös ACC-rendszerek

A különböző szabályozó körök külön-külön az egykörös rendszerhez hasonlítanak. A rendszer logikai része gondoskodik arról, hogy összehangoltan működjenek. Az ábrán bemutatott rendszerben az előtolás és a forgácsolási sebesség a módosított jellemző. Elvi különbségek az előtolás és a sebesség módosított jellemzőként való alkalmazásában nincsenek, a gyakorlati különbségek azonban jelentősek. ACC-rendszerekben ugyanis a sebesség változtatásának lehetséges tartománya igen szűk, mivel a forgácsolási sebesség a kopási folyamat legfőbb meghatározó tényezője. A kopás, az éltartam folyamat közbeni kiértékelése vagy mérése lenne

szükséges ahhoz, hogy a sebesség teljes értékű módosító tényező lehessen. Így az ACC-rendszerekben a forgácsolási sebesség /fordulatszám/ módosítását elsősorban a túlterhelés elleni védekezésre alkalmazzák.

A rendszerben mérhetők vagy kiértékelhetők olyan további értékek, amelyek nem közvetlenül szabályozási célokat szolgálnak. Megfelelő kijelzéseket idéznek elő vagy végső esetben a forgácsolási folyamatot is leállítják. Ilyen eset lehet a tartós túlterhelés, amely szabályozással már nem védhető ki, a megengedettnél nagyobb mérvű deformáció, lengésamplitudó stb.

A helyes stratégia megválasztása az AC-rendszerek építésekor felmerülő legfelelősségteljesebb feladat. Helytelen döntések esetében az is előfordulhat, hogy az AC-rendszer nem növeli, hanem csökkenti a megmunkálás hatékonyságát vagy legalább is nem tudjuk teljes mértékben kihasználni a rendszer nyújtotta lehetőségeket. Az AC gyakorlatában pl. előfordul, hogy a teljesítmény előírt értékének túllépését az előtolás csökkentésével próbálják kiküszöbölni. Ez megítélésünk szerint helytelen, az előtolás helyett a teljesítmény szabályozására a sebesség módosítása alkalmasabb, mivel módot nyújt kedvező technológiai adatok beállítására.

A stratégia megválasztásában szabad kezünk van akkor, ha a megadott követelményekhez alakítjuk ki a szerszámgépet és irányítási rendszerét, azaz új szerszámgépet tervezünk. Más a helyzet, amikor valamely más szempontok szerint megépített szerszámgépet szándékunk adaptív tulajdonságokkal ellátni. Ilyenkor a végrehajtó szervek rendszerint adottak, azok nem, vagy csak igen kis mértékben alakíthatók át, így a szerszámgép által meghatározott lehetőségek közül kell kiválasztani a legkedvezőbb stratégiát.

4.2.3. A technológiai adatok optimálása ACC-rendszerek alkalmazásakor

ACC-rendszerek működésének optimálásakor abból kell kiindulni, hogy a zavaró tényezők hatása jelentős. A rendszer matematikai modellje annyiban különbözik a 2. részben vázolt determinisztikus modelltől, hogy nem ismerjük a ráhagyást, vagy az anyagkeménységet, esetleg egyiket sem, sőt a folyamat néhány egyéb jellemzőjét sem. A rendszer műszaki kialakítása miatt a pillanatnyi előtolás ezeknek az ismeretlen mennyiségeknek a pillanatnyi értékétől függően változik, hiszen az előtolás a módosított jellemző. Nem játszik fontos szerepet, hogy a kezdeti pillanatban milyen előtolásértékkel kezdjük a forgácsolást, hiszen rövid

átmeneti folyamat után az előtolás a szabályozási kör által megszabott értékűvé válik. Mindenesetre ennek a kezdeti értéknek biztonságosnak kell lennie. Pl. ha ismerjük az előforduló minimális és maximális fogásmélység értéket és a szabályozott jellemző az erő, az ACC-rendszer által beállított minimális előtolás a 2. részben közölt képlet szerint:

$$s_{\min} = \left(\frac{F_{\max}}{C_{F_{\max}}^a x_F} \right)^{\frac{1}{Y_F}},$$

a maximális előtolás

$$s_{\max} = \left(\frac{F_{\max}}{C_{F_{\min}}^a x_F} \right)^{\frac{1}{Y_F}}.$$

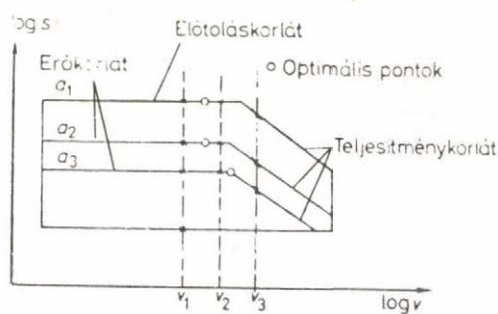
Ekkor az induló előtolás megválasztható, pl.

$$s_0 = \frac{s_{\max} - s_{\min}}{2}$$

értékűnek.

Az előtolás alkalmazható tartományát más tényezők is befolyásolhatják. A mindenkori kiinduló előtolás értékét úgy kell megválasztani, hogy az a legkedvezőtlenebb körülmények esetén is valamennyi feltételt megfelelő biztonsággal kielégítse. A későbbiek során e feltételeket az automatikus szabályozás elégíti ki.

Mivel a következőkben az előtolást a szabályozási rendszer automatikusan állítja be, a legfontosabb feladat optimáláskor a műveletelem ideje alatt általában nem változó forgácsoló sebesség lehető legjobb megválasztása. A problémát a 4.8. ábrán szemléltetjük. Az ábra olyan esetet mutat, amelyben a megengedett forgácsolási tartomány két határát valamely forgácsolóerő komponens, az előtolás és a teljesítmény korlátértékei alkotják. Ezek a korlátok különböző fogásmélységek esetében különböző tartományokat jelölnek ki. Az ábrán három különböző, a_1 , a_2 , a_3 fogásmélységnek megfelelő esetet mutatunk be. Feltételeztük, hogy az erő nem függ a forgácsolási sebességtől. Az ábrán mindegyik fogásmélységre feltüntettük az optimális pontokat.



4.8. ábra. ACC-rendszerek optimálása

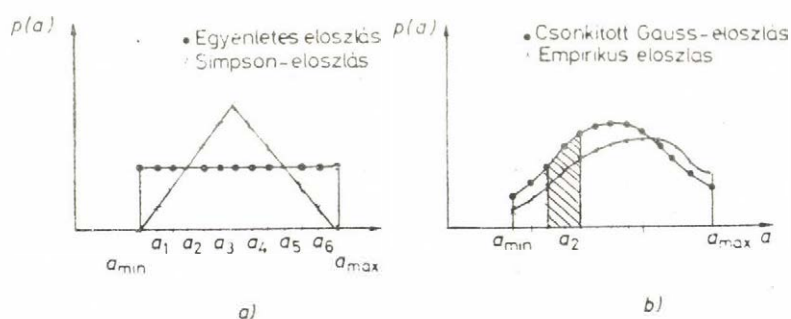
Ha a fogásmélység nem változna, az optimális pontoknak megfelelő sebességértékek adnák a célfüggvény minimális értékét. Ezeket a pontokat a 2. részben vázolt módszerrel lehet meghatározni. A fogásmélység azonban változik, s tételezzük fel, hogy az $a_1 - a_3$ határok között. Felmerül a kérdés, milyen forgácsolási sebességet célszerű megválasztani ilyen körülmények között. Az ábrán bejelöltünk három v_1, v_2, v_3 sebességértéket. Vizsgáljuk meg, melyikkel legcélszerűbb forgácsolni. Az ábra alapján nyilvánvalónak tűnik, hogy a v_2 sebesség a legkedvezőbb, hiszen ezt alkalmazva bármilyen fogásmélység esetén az optimális pont közelében levő adatokkal forgácsolunk.

Ez a szemléltető kép azonban téves eredményre is vezethet, hiszen nincs pontos mennyiségi jellemzőnk arra, hogy a 4.8. ábrán az optimális pontoktól mért távolságok milyen növekedést jelentenek a célfüggvény értékében.

A megoldás a probléma matematikai megfogalmazásában keresendő. Az adott esetben a fogásmélységet pontosan nem ismerjük, azonban rendszerint tudjuk a változások határait és lehetnek ismereteink a változások természetéről. Vizsgáljunk néhány konkrét példát. Rudanyagot esztergálunk. Amikor átmérője maximális: a fogásmélység a_{\max} , amikor minimális, a_{\min} , amikor a méret névleges:

$$a = \frac{a_{\min} + a_{\max}}{2}.$$

Feltételezhető, hogy a méret és így a fogásmélység szórása a névleges értékek körül csonkitott normális /Gauss-/ eloszlású. Más esetekben ez lehet Simpson-eloszlás, vagy megtörténhet, hogy az eloszlás törvényszerűségét mérésekkel kell meghatározni. Amikor kupot esztergálunk, valamennyi fogásmélység egyforma mértékben fordul elő. Ez az eset azonosan kezelhető azzal, amikor a fogásmélység eloszlása egyenletes. Végül, amikor valamely fogásmélység valószínűsége 1, visszatérünk a determinisztikus esethez, hiszen ekkor a fogásmélység ismert. A fenti eloszlásfüggvényeket a 4.9. ábra szemlélteti.



4.9. ábra. Fogásmélység-eloszlási törvények

Vizsgáljuk meg, hogy ezeknek az eloszlásoknak az ismeretében vagy feltételezésével, hogyan tudjuk meghatározni az optimális forgácsolási sebességet. Ekkor az optimálás célja abban tűzhető ki, hogy olyan forgácsolási sebességet válasszunk meg, amely mellett a megmunkálási költség /idő/ várható értéke minimális. Ehhez a következő egyszerűsítő feltételeket tesszük. Az $a_{\max} - a_{\min}$ tartományt meghatározott számú részre osztjuk és csak az így kialakult szakaszok középpontjainak megfelelő fogásmélységet tekintjük megengedhetőnek /4.9a ábra, $a_1, a_2, a_3, \dots, a_6$ /. Ezekhez a diszkrét fogásértékekhez a fogásmélység adott szakaszba jutásának valószínűségét rendeljük hozzá /az eloszlás-görbe adott szakaszra eső része alatti terület a 4.9b ábrán látható/.

A másik egyszerűsítés, hogy csak azt az esetet vizsgáljuk, amikor a forgácsolási sebesség diszkrét v_1, v_2, \dots, v_N értéket vehet fel. Ez a gyakorlati esetek többségét felöleli. Legyen az i -edik főorsófordulat bekapcsolva, tehát $v = v_i$, vagyis $n = n_i$. Az adott $a_j = a_1, a_2, \dots, a_s$ fogásmélység mellett könnyen meg lehet határozni azt az előtolást, amelyet az AC-rendszer automatikusan beállít.

Amikor előtoláskorlát határolja be a technológiai lehetőségeket, az előtolás értéke készen adott. Ha a rendszer erőkorlátra kerül, akkor az előtolás értéke /lásd a 4.8. ábrát/ az

$$s_{ji} = \left(\frac{F_{\max}}{C_F a_j} \right)^{\frac{1}{x_F}}$$

összefüggéssel számítható. Hasonló képlet alkalmazható, ha a teljesítménykorlát szabja meg az előtolást.

Az 1. részben ismertetett matematikai modell valamennyi változó mennyisége a_j , v_i , s_{ji} ismert, így a közölt képletek alapján számíthatók a T_{ji} éltartamok, majd a

$$K_{ji} = \frac{C_M}{n_i s_{ji}} \left(1 + \frac{C_T}{T_{ji}} \right)$$

költségek /vagy idők/. Ez a számítás sorban valamennyi a_j fogásmélységre elvégezhető.

Az egyes fogásmélységek p_j valószínűsége alapján meghatározható a megmunkálási költség /idő/ várható értéke

$$E_i = \sum_{j=1}^S p_j (a_j) K_{ij}$$

Az i index itt azt mutatja, hogy ez a költség várható értéke, ha a forgácsolási sebesség $v = v_i$. Kiszámítjuk sorban ezt az értéket $v_1, v_2, v_3, \dots, v_N$ esetekre, s az lesz az optimális sebesség, amelynél a költség /idő/ várható értéke minimális.

Az itt vázlatosan leírt módszert részletesen taglalja a [2.8] munkaanyag. A módszert realizáló számítógépi programokat az MTA SZTAKI CDC 3300-as számítógépre dolgozták ki. A vázolt módszer alkalmazható akkor is, amikor a forgácsolás során a változások jelentősek, de nincs a szerszámgépen AC-berendezés. Ekkor az előtolás nem változik és értékét a legkedvezőtlenebb esetre kell megállapítani. A forgácsolási sebességet azonban célszerű a változások törvényszerűségeit tekintetbe véve, valószínűségi alapon, tehát a fent vázolt módon meghatározni. A módszer tehát tulmutat az AC keretein s jelentős lépés azon az uton, amellyel a második részben foglalkoztunk: ez a forgácsolási folyamat valóságnak megfelelően sztohasztikus folyamatként való kezelése. Mivel az itt vázolt módszer gondolatmenete erősen kapcsolódik az ACC-rendszerhez, ezért csatoltuk a második rész helyett a jelen ponthoz.

┐

A jelen pontban foglaltak elméleti jelentősége nagy, hiszen világossá teszi az ACC rendszerek esetében alkalmazandó irányítási stratégia legfontosabb elemeit.

Azonban, a gyakorlati alkalmazás olyan mennyiségű információt és számításokat igényel, amely ipari körülmények között ritka esetben biztosítható.

Az ACC alkalmazás legfontosabb célja a biztonságos forgácsolás.

A hatékonyság növekedése abból eredhet, hogy a biztonságos feltételek automatizált megvalósítása lehetővé teszi a túlbiztosított, legrosszabb esetre megállapított adatokkal való szakítást. Azonban, mivel a jelen pontban vázolt eljárás alkalmazása nehézségekbe ütközik, a hatékonyság kérdése problematikus is válhat.

A nyilvánvaló továbblépés útja az előtoláson kívül a forgácsoló sebesség szabályozása. Ekkor a jelen pontban foglaltak alkalmazása feleslegessé válik és megvalósítható a hatékony, a mindenkor körülmények megfelelően optimális, biztonságos forgácsolás.

Erről bővebben a következő pontban lesz szó.

4.2.4. Optimáló adaptív irányítási rendszerek

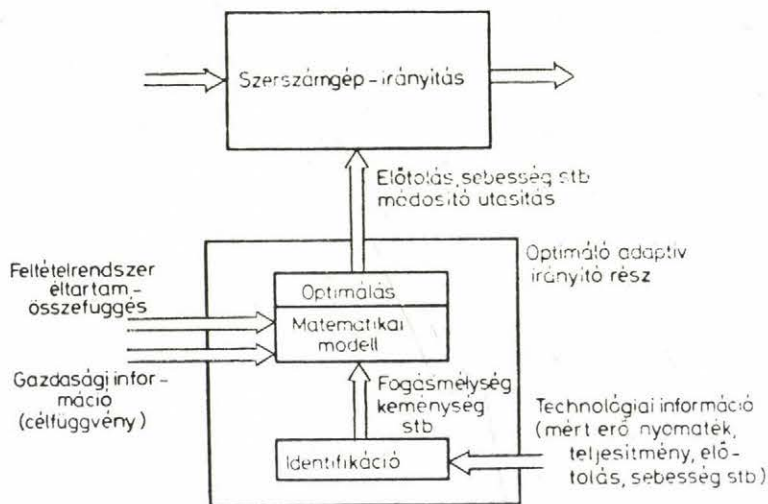
Az előző pontban bemutatottuk, hogyan kell megválasztani a forgácsolási sebességet az előtolást szabályozó ACC-rendszerekben. Ez a sebesség egy-egy műveletelem során nem változik.

Vizsgáljunk most egy olyan rendszert, amelyben mód van a forgácsolási sebesség megváltoztatására is a körülmények változásának megfelelően. Ez azt jelenti, hogy elvileg bármilyen fogásmélység esetében be lehet állítani a 4.8. ábrán 0-val jelölt optimális pontot. Tételezzük fel, hogy a sebesség fokozatmentesen változtatható. Mint említettük, ha előre pontosan ismernők az MKGS-rendszer jellemzőit, nevezetesen a fogásmélységet, anyagkeménységet stb., akkor visszatérhetnénk a 2. részben leírt determinisztikus módszerhez a technológiai adatok meghatározására. Azonban ezek a jellemzők változnak és az adaptív irányítás alkalmazását éppen ez a változás indokolja.

Ahhoz, hogy a forgácsolási folyamat a változások ellenére is optimálisan folyjék, időről időre meg kell határozni az MKGS-rendszer jellemzőinek pillanatnyilag érvényes értékét, vagyis meg kell oldani az identifikálást. Ezután meghatározott jellemző értékekkel meg kell határozni az optimális adatokat.

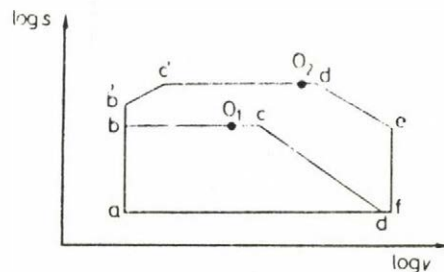
A 4.1. szakaszban vázoltuk, hogy a megmunkálási folyamat jellemző mennyiségei kiértékelhetők a mérési eredményekből. Természetesen a feladat általában nem egyszerű, mert egyszerre változik a rendszer több jellemzője, a mérések eredményei zajjal kevertek, az összefüggések nem pontosak stb. Az identifikáció megoldása általában bonyolult, sokoldalú vizsgálatot igényel.

A 4.5. ábrán bemutattuk az optimáló adaptív irányításu szerszámgép általános felépítését. A 4.10. ábrán részletesen szemléltetjük az irányító rész felépítését. Az ábra további magyarázatot nem igényel.

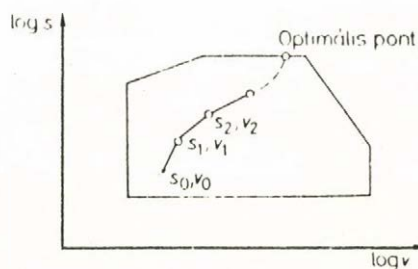


4.10. ábra. ACO-irányító rész

Az ACO-rendszer működési elve és hatékonysága a 4.11. ábra alapján jól megítélhető. Az utolsó optimálás t_1 időpontjában az a-b-c-d tartományban kerestük és az O_1 pontban találtuk meg az optimumot. Az aktuális t_2 pillanatban a ráhagyás és keménység kedvezőbb alakulása következtében nagyobb a-b'-c'-d'-e-f' sokszög alkotja az optimumkeresés határait s az optimumot az O_2 pontban találjuk. Az ACO ennek megfelelően utasítást ad a fordulatszám, valamint az előtolás módosítására.



4.11. ábra. Az optimális pont vándorlása



4.12. ábra. Az optimális pont keresése

Vizsgáljuk meg, hogy az így leírt működési elv milyen konkrét törvényszerűségekkel valósítható meg. Tételezzük fel, hogy valamely műveletelem kezdetekor a forgácsolás megengedett tartományát a 4.12. ábra mutatja. A forgácsolás kiinduló adatait úgy kell megválasztani, hogy még a legkedvezőtlenebb esetben is biztonságosak legyenek. Mérések alapján identifikálni lehet a körülményeket s kiszámíthatók az optimális forgácsolási adatok. A következő feladat beállításuk. Nagyon sok mulik azon, hogyan oldjuk meg ezt a feladatot.

A rendszer dinamikája korlátot szab az optimális pont felé való közeledés sebességének. Ezt a sebességet tudatosan is célszerű csökkenteni, mert így "utközben", lépésről lépésre mód van az identifikáció eredményeinek pontosítására. A biztonságos s_0 , v_0 adatpárral indított forgácsolás mérési adataiból a szabályozó berendezés kiértékeli az optimális megmunkálási adatokat, majd a pillanatnyi adatokat úgy változtatja, hogy közelítsenek az optimális értékekhez. Egy későbbi időpontban $/s_1, v_1/$ újabb kiértékelés következik, majd a folyamat hasonlóan folytatódik. Ilyen módon elérkezünk a pillanatnyilag érvényes optimális pontig. A későbbiekben /nem túl gyors változásokat feltételezve/ a technológiai adatok úgy fognak változni /szintén viszonylag lassan/, hogy a körülmények változása ellenére optimálisak maradjanak.

Rendkívül fontos gyakorlati kérdés az egész irányítórendszer felépítése és működése szempontjából, hogy az optimális pont felé való közelítés milyen módon történik. Az ACO-rendszerek általános leírásakor /lásd a 4.5. ábrát/ vázoltuk, hogy ACO-rendszerek felépítésének legcélszerűbb módja ACC-rendszerek célszerű kombinációja, kiegészítő optimálórész beépítésével. Ez a felépítés lényeges hatást gyakorol az optimális pont felé való közelítés módjára is. Ilyen rendszerek az optimálásra vonatkozó és a 2. részben ismertetett 2. tétel felhasználásával alakítható ki.

Az eddig megvalósított AC-rendszerek ennek a javasolt felépítésnek és működési módnak számos jelét magukon viselik. Szigorúan a 4.5. ábrán vázolt felépítést realizáló rendszer fejlesztése az MTA SZTAKI-ban folyt.

4.2.4.1. Egy lehetséges optimálórész adaptív /ACO/ irányítási stratégia

Vizsgáljuk azt a kérdést, hogy a 2. részben javasolt optimálási módszer fényében mi tűnik a legcélszerűbb optimálórész adaptív irányítási stratégiának.

A forgácsolás megengedett tartományát /4.13. ábra/ nem ismerjük, mert ezt a véletlenszerűen változó körülmények szabják meg. A változások jelentősek, hiszen éppen

ez indokolja az adaptív irányítás alkalmazását. A forgácsolást a megengedett tartomány belsejének valamely biztonságos pontjában kell megkezdeni /A pont/. Ebből a szempontból az ACC és az ACO rendszerek nem különböznek egymástól. Az optimális pontot meg tudjuk találni olyan módon, hogy első lépés gyanánt, az előtolást és esetleg a forgácsoló sebességet is úgy változtatjuk, hogy az optimumesélyes határvonalra kerüljünk. Ennek egy lehetséges megoldása az, amikor a forgácsoló sebességet állandónak hagyjuk és az előtolást addig változtatjuk, ameddig a határvonalra nem kerülünk. Nyilvánvaló, hogy ez nem más, mint előtolás-szabályozással megoldott ACC működés./Mivel az átmeneti folyamatok gyorsak, a fenti esettől elvileg nem különbözik lényegesen az sem, amikor hasonló célból az előtolást és a sebességet összehangoltan változtatjuk; például úgy, hogy a határvonalat -45° -os egyenes mentén érjük el./

Amikor elérünk a megengedett tartomány határának bizonyos kis környezetébe /B pont/, döntést kell hozni, hogy a forgácsolási sebességet hogyan változtassuk. Ennek legcélszerűbb módja a B pontban érvényes pillanatnyi szerszám éltartam kiértékelése és az adott feltételi egyenesre érvényes optimális éltartam érték összehasonlítása. Amennyiben a pillanatnyi éltartam nagyobb, mint az optimális érték, a sebességet növelni, ellenkező

esetben csökkenteni kell. Amikor a kiértékelt éltartam az optimális érték adott környezetébe kerül, vagy a forgácsolás jellemzői megengedett tartomány határához érkeztünk /például a teljesítménykorláthoz/, akkor a forgácsolás az optimális adatokkal folyik.

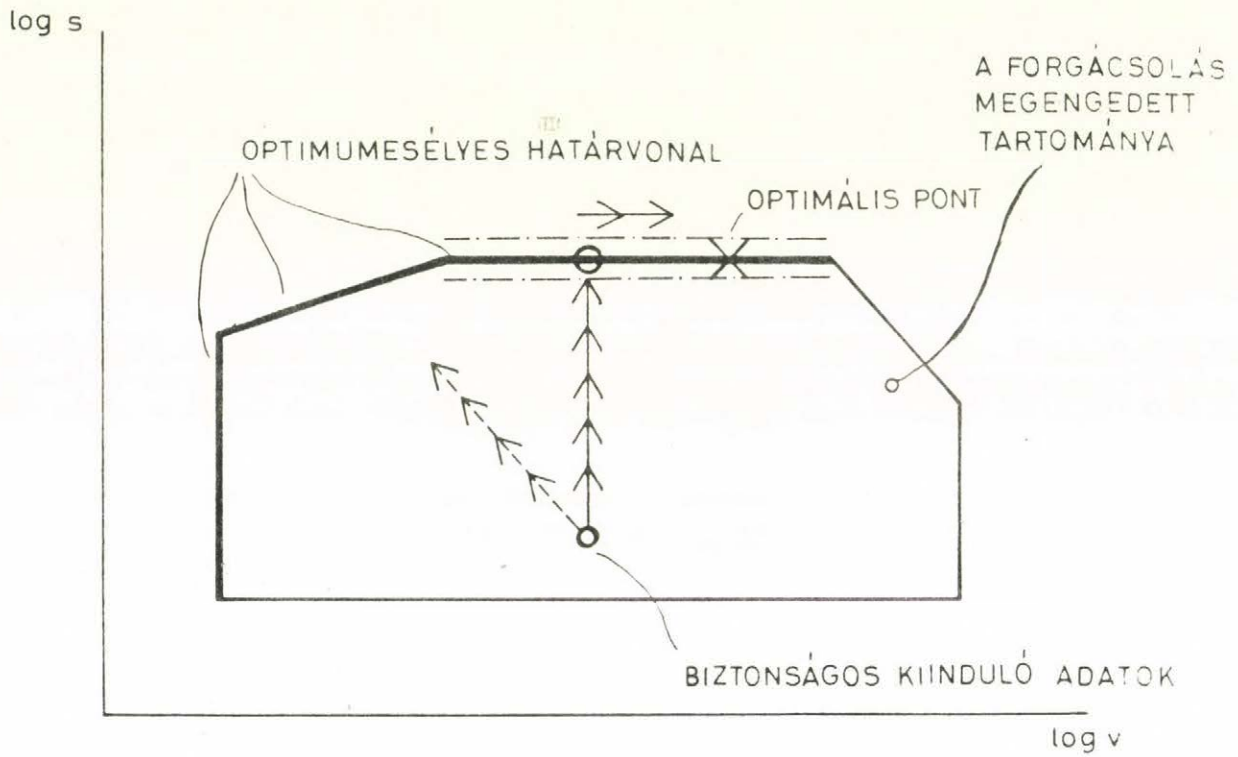
Amikor a sebesség, vagy a körülmények változása miatt a folyamat jellemzői úgy alakulnak, hogy a forgácsolási adatok nem a megengedett tartomány határán való forgácsolást eredményeznek, akkor az előtolást szabályozó kör működése ezt az állapotot gyorsan újra előállítja.

Nyilvánvaló, hogy a fent vázolt irányítási stratégia a 2. részben javasolt optimálási módszert realizálja és annak 1. és 2. tételével teljes összhangban van. Különösen fontos ebből a szempontból a 2. tétel, hiszen az optimális pont unicitása az a tény, amely az irányítási algoritmust ilyen egyszerűvé teszi.

Az adaptív irányítás alkalmazása NC gépek esetében a legkedvezőbb, bár nem NC alkalmazások is előfordultak és előfordulnak.

A fent vázolt ACO algoritmus megvalósításához kedvező körülményeket teremt a CNC berendezések alkalmazásának rendkívüli kiszélesedése, sokoldalúságuk, lehetőségeik, teljesítőkéességük példátlan mértékű fokozódása.

A 4.13. ábrán szemléltetettek alapján világos, hogy a javasolt ACO irányítási stratégia lényegileg realizál-



4.13. ábra.

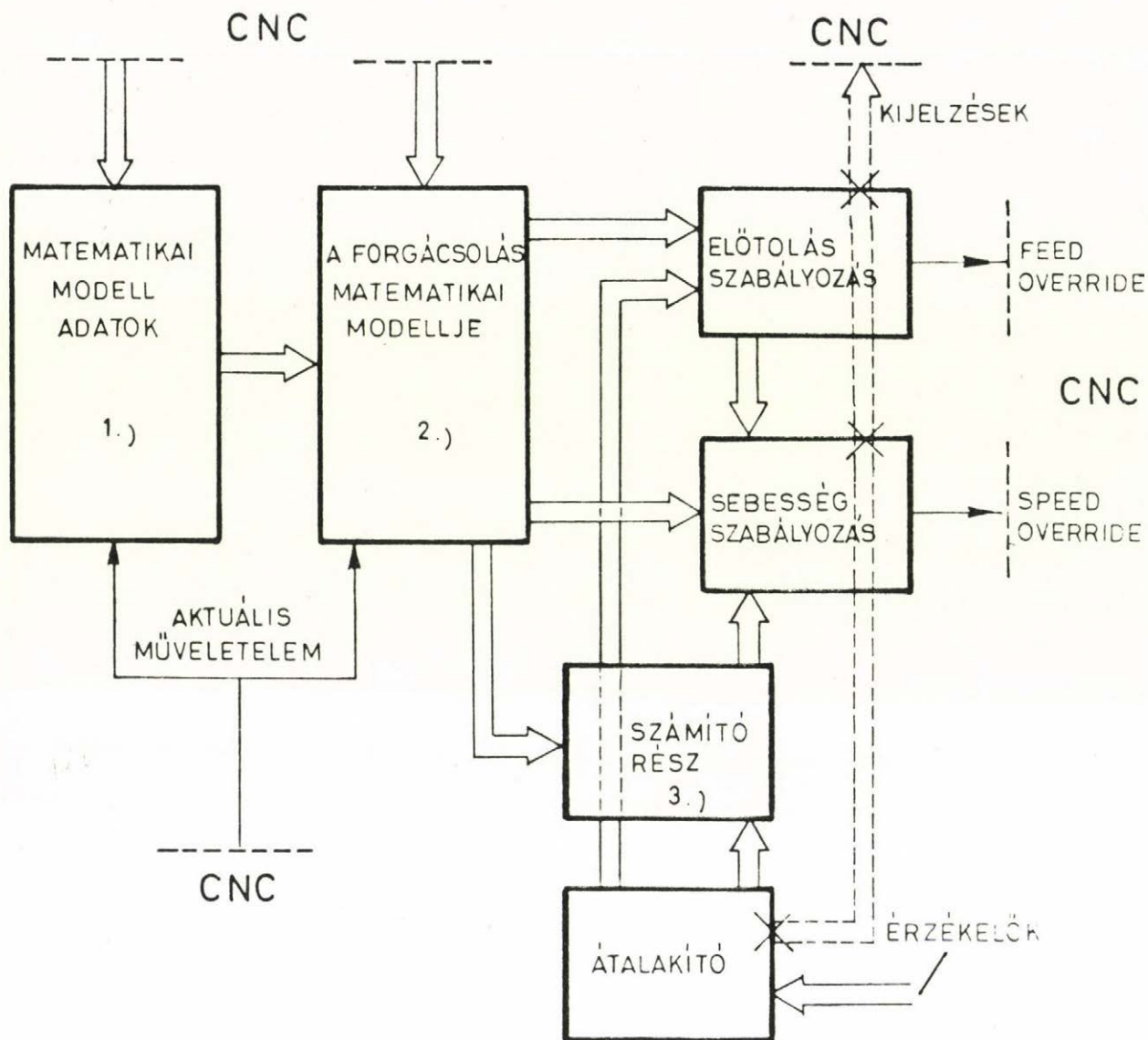
Optimalizáló adaptív irányítási stratégia.

ható a 4.7. ábrán vázolthoz hasonló több szabályozóköörös ACC berendezéssel. Természetesen a blokkvázlat elemeinek rendelkeznie kell a vázolt működési algoritmus realizálásához szükséges műveleti, számítási lehetőségekkel.

Ma már nyilvánvaló, hogy ACO rendszerek megvalósításának legcélszerűbb útja CNC berendezések megfelelő opciókkal való ellátása. Az AC feladatokat ellátó opció a hardware költségeket igen csekély mértékben növeli. Jelentős lehet a know how és a software feladatok megoldására fordított munka.

CNC ACO opció kialakításának egy lehetséges megoldását a 4.14. ábra mutatja.

A forgácsolás matematikai modelljét és ennek konkrét adatait a CNC berendezés adatvonalához csatlakozva kapja meg az opció. Ezek egy része állandó /gépre vonatkozó adatok/, másik része konkrét megmunkálási esetekre vonatkozik és a munkadarabok NC programjához csatlakoztatható. A CNC berendezés adatvonalán feltöltött 1., 2. jelzésű blokkok, amikor az NC program aktualizál valamilyen műveletelemet, szintén aktualizálják a megfelelő matematikai modellt és ezzel a szabályozók alapjeleit, szabályozási algoritmusait, az ezekhez szükséges adatokat, összefüggéseket /például a 3. blokk számára az éltartam összefüggést/.



4.14. ábra.

CNC ACO opció blokkvázlata

Az érzékelők jelei alapján, elvégezve a vázolt irányítási stratégia realizálásához szükséges nem túl bonyolult műveleteket, az előtolás és a sebesség szabályozók a CNC feed, illetve speed override csatornáin keresztül avatkozhatnak be a pillanatnyi viszonyoknak megfelelő optimális forgácsolási adatok eléréséhez. Fontos tulajdonsága a rendszernek az is, hogy az érzékelt, vagy számított mennyiségek /például szerzőszám éltartam/, mint ezt a 4.14. ábra is mutatja, ki jelezhetők. Így az adaptív irányítás és a monitorizálási és diagnosztikai feladatok megoldása közvetlen kapcsolatba kerül.

A vázolt irányítási stratégia megvalósítási problémáinak tisztázása céljából, a jelen értekezés szerzőjének vezetésével, az MTA SZTAKI-ban kísérleti berendezés készült 4.1. Az ezzel végzett forgácsolási kísérletek beigazolták, hogy az ismertetett forgácsolási stratégiai korszerű elektronikai eszközökkel hatékonyan megvalósítható. Felhasználva a szerző és munkatársai által szabadalmaztatott [4.2] programozható többfunkciós konvertert, az opció kialakítása különösen egyszerűvé és univerzálissá válik.

4.2.5. Szerszámgépek adaptív irányításának alkalmazása

Helyzetkép

Világszerte nagy feltűnést keltett, amikor 1973-ban a Hannoveri szerszámgép kiállításon /IHA '73/ tömegesen jelentek meg az adaptív irányítású szerszámgépek.

Ez a kiállítás azonban csak a figyelemfelkeltés szempontjából volt jelentős eseménye ennek a szakmai iránynak, hiszen jelentős eredményei már korábban is ismertek voltak.

Különös figyelmet érdemel a B.Sz. Balaksin, a Moszkvai Sztankin professzora vezetésével kialakult szovjet iskola tevékenysége, amelyekről 1973-ban már összefoglaló monográfia is megjelenhetett [4.3].

Többek között munkáik eredményeképpen a Szovjetunióban adaptív irányítású szerszámgépeket jelentős számban dolgoztak ki és ezek ipari alkalmazása széles körű.

A jelen értekezés írója és szerzőtársa a [4.4] könyvben közel 100 1973-ig kifejlesztett AC gép főbb jellemzőit adja meg.

Ennek a periódusnak a legtipikusabb jellemzői a SZTANKIN-Ordzsonokidze Szerszámgépgyár hidraulikus AC félautomata másolóesztergája, a Gildemeister és a Pittler cégek AC esztergái, az NDK-ban kifejlesztett

ACEMA rendszer, a Cincinnati Co. Acramizer elnevezésű marógép vezérlése, a Makino MCC 100-A megmunkáló központ ACO rendszere. Ezekről és más rendszerekről a [4.4] munka részletesebb leírásokat, elemzéseket nyújt.

Az 1970-es évek második felében a szerszámgépek adaptív irányításával kapcsolatos vélemények kezdtek kevésbé optimistává válni. Ezt az sem ingatta meg, hogy R.A. Mathias, aki a Cincinnati Milacron cégnél megalkotta az Acramizer rendszert, önálló vállalatot alapított és Macotech néven forgalmazott AC berendezéseik meglehetősen elterjedtek és tömeges amerikai alkalmazásaikról jöttek hírek.

Az 1980-as évek elejére a helyzet gyökeresen megváltozott. Egyre fontosabb követelmény lett, hogy a gépek közvetlen emberi felügyelet nélkül is működhesse-
senek. Ezen belül az adaptív irányítás egyre növekvő szerepet kapott. Az adaptív irányítástól alig elválasztható monitorizálási és diagnosztikai feladatok megoldása szintén a figyelem központjába került.

A vázolt tendencia élesen megfigyelhető a szerszámgépipar reprezentatív rendezvényein. A 10. Japán Nemzetközi Szerszámgép Kiállítás /Tokyo, 1980. okt.-nov./ az American Machinist folyóirat szerint [4.5] a "felügyelet nélküli gépek" jegyében zajlott le.

A 4. EMO szerszámgép világkiállítás /Hannover 1981. szept./ más szakmai szenzációk mellett, az adaptív irányítású gépek sorát vonultatta fel. Ebből a szempontból is a japán cégek jeleskedtek, amelyek közül nehéz olyat említeni, amely ne állított volna ki AC gépet. Néhányat ezekből felsorolva, a Nigata Co., a Makino, a Yamazaki, az Okuma and Howa, a Mitsui Seiki, a Mitsubishi cégek gépei emlithetők meg.

Az amerikai Kearney and Trecker cég az MM 180 megmunkáló központját optimalizáló adaptív irányítási rendszerrel ellátva állította ki. Részletesebb értékelést a kiállítás tanulságairól az értekezés szerzője a [4.6] cikkben nyújtott.

Az adaptív irányítás területén a jelenlegi helyzetkép és ezen belül a javasolt ACO stratégia helye a következőkben körvonalazható:

A gyakorlati alkalmazásban sikeresnek bizonyult a főorsó teljesítmény /vagy az ezzel arányos valamely más mennyiség, például: áramerősség/ érzékelése és a mérési eredmény felhasználása AC feladatok megoldására. Kísérletek folynak más mennyiségek /vibráció, szerszámkopás stb./ mérésére is, de ezek egyelőre az ipari felhasználás szempontjából kisebb jelentőségűek.

Az irányítási stratégiák közül az előtolás szabályozással működő ACC megoldások kapnak szélesebb te-

ret, mert nagyjelentőségűek a forgácsolás biztonsága szempontjából. Ez a mindig is fontos szempont a közvetlen emberi felügyelet nélküli rendszerek kialakítására való törekvéssel egyidejűleg egyre fontosabb és fontosabb szerepet kap.

Az AC feladatok megoldása könnyen integrálható a korszerű CNC berendezésekbe. Ez lényeges többletköltséggel nem jár és az AC opciók kialakítása még akkor is célszerű, amikor a technológiai know how hiánya miatt alkalmazásuk korlátozott.

Az előtolás szabályozással működő ACC rendszerek mellett különböző más egyszerű megoldások is teret kapnak. Így például az utóbbi időben népszerűek azok a rendszerek, amelyeknél valamely mintadarabnak tekintett munkadarab megmunkálásakor felveszik a terhelési adatokat és amikor a következő megmunkálásokkor a terhelés kilép a mintadarabnál felvett érték adott környezetéből a CNC automatikus szerszámcserét kezdeményez, vagy leállítja a megmunkálást.

Egyre nagyobb szerepet kapnak a szerszám éltartam ellenőrző rendszerek is, különösen sokszerszamos megmunkáló központoknál.

A nehézséget az AC alkalmazások egyre szélesebb körű elterjedésében az okozza, hogy a technológiai

ismeretek nem fejlődnek olyan gyorsasággal, mint ahogy ez a korszerű elektronikai eszközök fejlődésével megnyíló lehetőségek kihasználásához szükséges lenne.

Már megemlékeztünk a technológiai információs rendszerek fontosságáról és a létesítésükre irányuló hatalmas erőfeszítésekről. Ezek ellenére, számos esetben, jelenleg még nehéz konkrét esetekre érvényes megbízható adatokhoz jutni. Az, hogy az alkalmazó esetenként kísérleteket kénytelen végezni, megbízható adatokat kénytelen beszerezni, gátolhatja az adaptív irányítás elterjedését. Az egyszerű ACC alkalmazások esetében ez a probléma nem áll fenn, sőt az ellenkezője igaz. ACO rendszerek esetében azonban jelentkezik. Az ACO rendszerek előnye éppen abban áll, hogy több információ alapján hatékonyabb működésre képesek. Ezt az információt valahogy meg kell szerezni. Erre ma még csak kevés, kivételesen kulturált környezetben képesek. Az előrejelzések azonban döntő változásokat jósolnak ezen a területen is.

A jelen értekezésben vázolt ACO stratégia jelentősége többek között abban áll, hogy a biztonságos forgácsolást eredményező ACC rendszereket úgy kombinálja, hogy ebből optimális működés alakuljon ki. Eközben a jelenleg olyan fontos éltartam

ellenőrzés automatikusan megvalósul.

Előnye még a vázolt elvnek, hogy amint a forgácsolási folyamatot jellemző újabb és újabb mennyiségek mérhetővé válnak, ezek alapján újabb és újabb szabályozási körök alakíthatók ki. Így a forgácsolási folyamat valóságos jellemzői egyre kézbe foghatóbbá válnak olyan módon, hogy az optimálás szempontjai maximálisan érvényesülnek.

5. Hierarchikus gépipari rendszerek, optimálásuk és a szerszámgépek adaptív irányításának kapcsolatai

Az értekezés 3. része bemutatta, hogy a technológiai tervezés, ezen belül a műveletelemek optimális adatainak megválasztása hogyan kapcsolódik a gépipari termelési rendszerek más hierarchikus szintjeihez.

A műveletelemek adatait a technológiai tervezés során határozzák meg. Ezek közvetlen kapcsolatban állnak a műveleti törzsadatokkal, a szerszámkopásokkal stb. Így alapul szolgálnak a termelésirányítási problémák megoldásakor.

Korszerű körülmények között, mint vázoltuk, mód van a szintenkénti optimálás problémáinak megoldására és ennek beépítésére magasabb szintű problémák megoldásába.

Érdekes lehetőség a termelésirányítási szempontok érvényesítése a technológiai adatok megvalósítása során. Ez a javasolt másodlagos optimálási módszer alkalmazásával oldható meg.

A technológiai tervezés feladatait rendszerint a termelésirányítási problémáktól függetlenül oldják meg. Általános esetben csak állandó környezetben

/tömeggyártás/, van lehetőség hasonló kapcsolatok realizálására.

Azonban, a tervezési módszerek és eszközök korszerűsödésével ez a lehetőség közelebbre kerül.

Vizsgáljuk az 5.1.a. ábrát. Ez a klasszikus megoldást mutatja, amikor a technológiai adatokat a gyártástól "távolabb" határozzák meg.

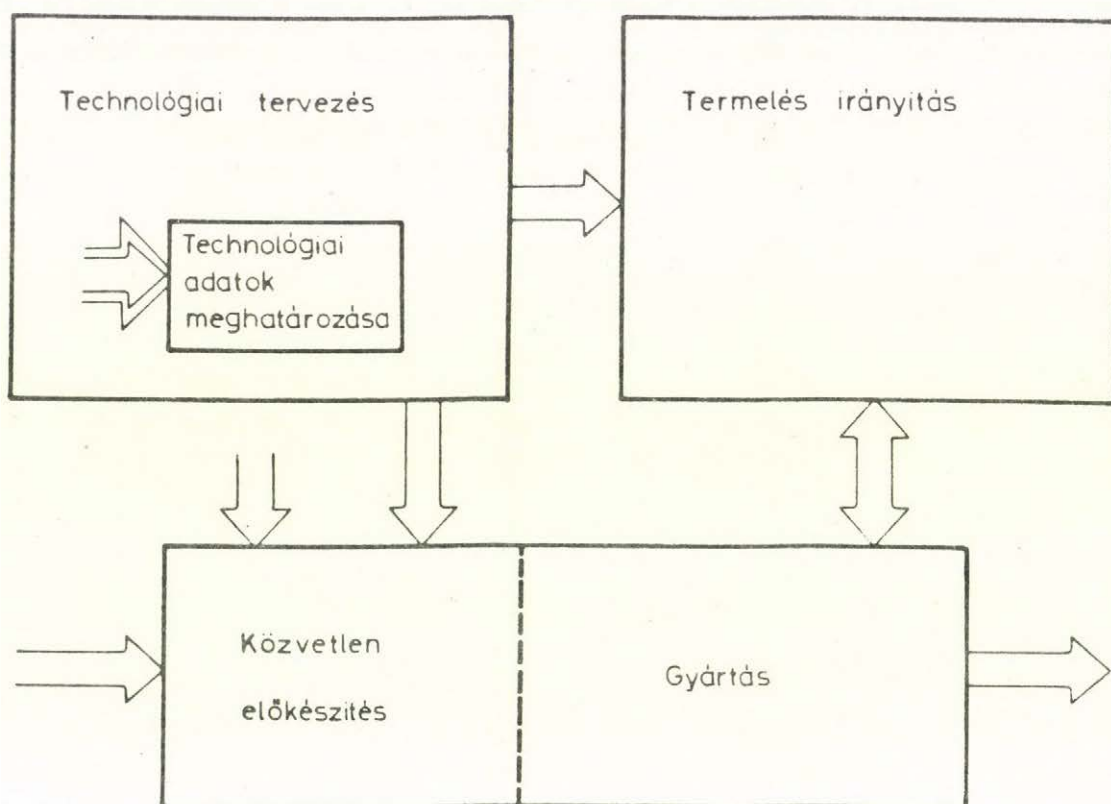
Közismert, hogy az ilyen felépítésű rendszer konkrét működése eltér a tervezettől és a körülmények változásának a hatása felülbírálási /override/, módosítási intézkedésekkel kompenzálható.

Természetesen a rendszer csak az adott kereteken belül tartható kézben és hatékony működéséről ilyen korlátok között lehet beszélni.

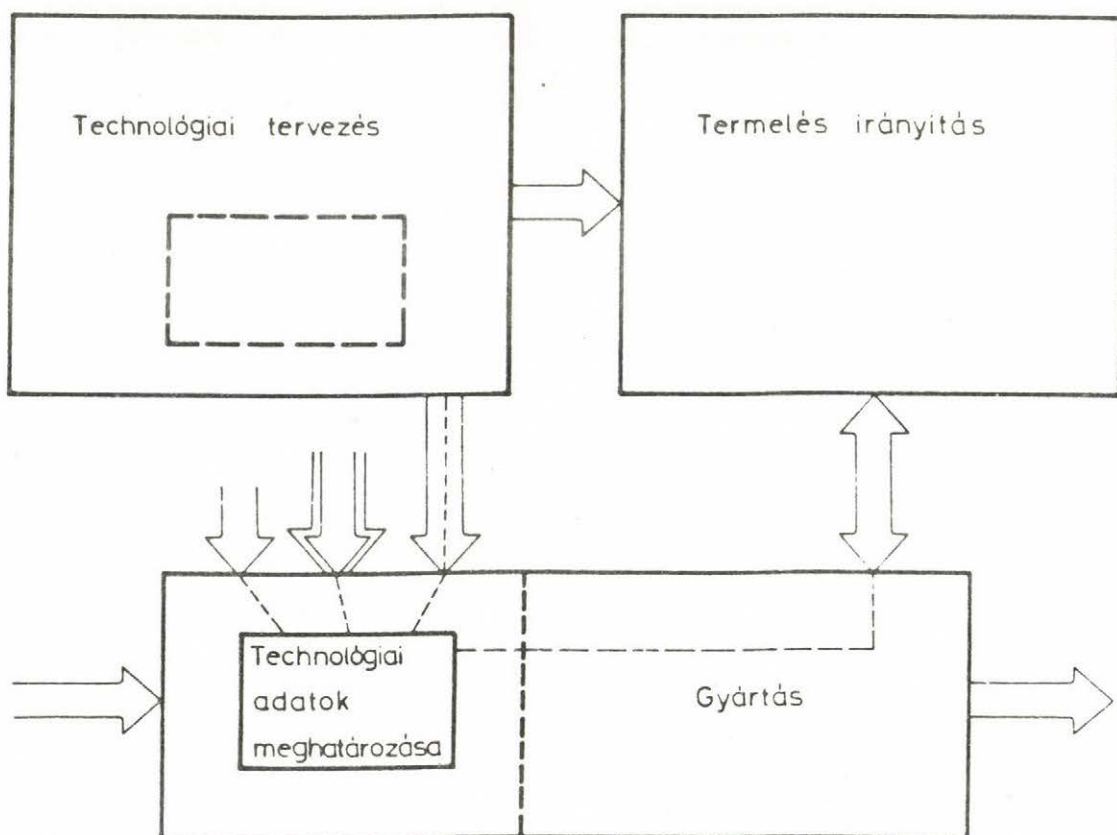
Az 5.1.b. ábra a rendszer másféle felépítését mutatja, amely korszerű körülmények között egyáltalán nem irreális. Itt a technológiai adatokat közvetlenül a gyártás közelében határozzák meg. Ekkor a technológiai adatokat meghatározó alrendszer megkapja ugyanazokat a kiindulási adatokat, amelyeket mint a technológiai tervezési rendszer része kapott, de működésének hatékonysága sokkal nagyobb, mert alkalmazkodhat a változó körülményekhez és a termelésirányítási szituációhoz is /másodlagos optimálás/.

a)

- 281 -



b.)



5.1 ábra.

Technológiai adatok meghatározásának helye termelési rendszerekben

Nyilvánvaló, hogy a forgácsolási adatmeghatározás nem maradhat ki a technológiai tervezés műveleteiből sem, hiszen a termelésirányítás számára elengedhetetlen információkat generál. Így, az adott felépítés esetén, ezt az alrendszert valamilyen módon duplikálni kell.

Az utóbbi időben tömegesen jelennek meg azok az eszközök, amelyek a technológiai tervezést, vagy annak részeit közvetlen gyártásközelbe esetenként magába a CNC berendezésbe viszik át [4.6.] . Így például a FANUC System P-Model D mikrogépes NC programozó állomás közvetlenül a szerszámgép közelébe viszi az NC program készítést. A FANUC System P-Model F közvetlenül a FANUC CNC vezérléssel összekapcsolható. A Yamazaki cég MAZATROL T-1 CNC eszterga vezérlő berendezése egyben grafikus display-t tartalmazó tervezői állomás, amely a technológiai adatokat is automatikusan határozza meg.

Ez komoly rendszertechnikai problémát vet fel. Nem világos, hogy a különböző szintű termelésirányítási problémák milyen helyen épülnek be a rendszerbe. Nyilvánvaló, hogy a technológiai tervezés termelésirányítási feladatok megoldásához szükséges adatait ki kell menteni. Valamint célszerű a termelésirányítás alacsonyabb szintjeit, nevezetesen

a termelésprogramozást gyártás közelbe vinni.

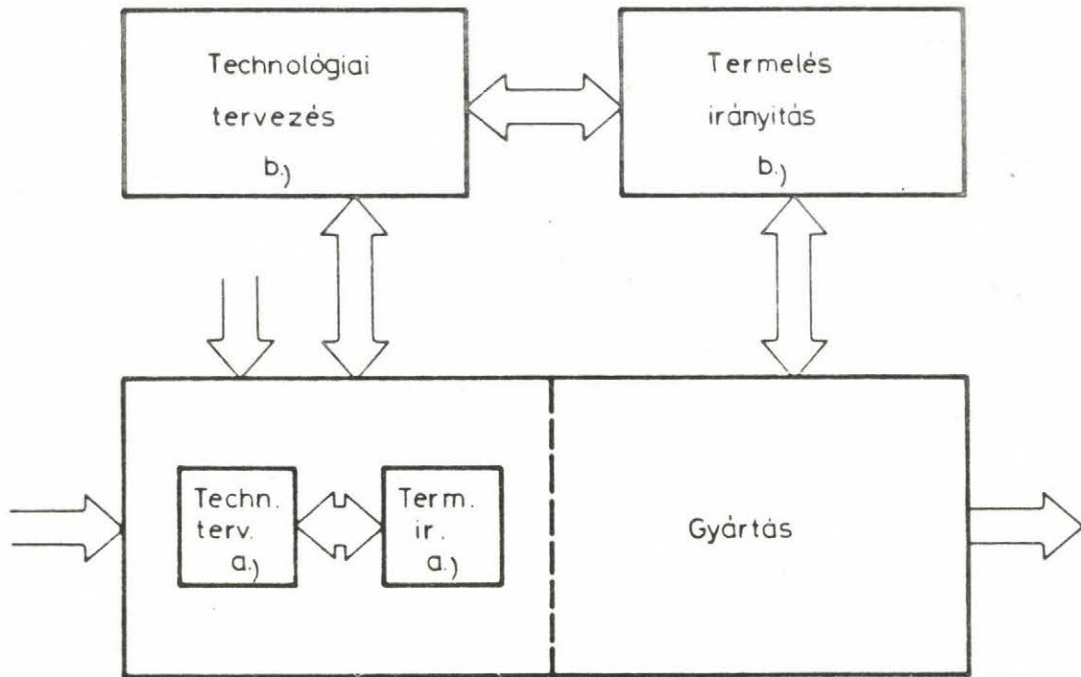
Tulajdonképpen a rendszer átalakul az 5.2. ábrán látható formába. Itt a technológiai tervezés is és a termelésirányítás is két részre osztódik szét. Az egyik közvetlenül a gyártás közelében, azzal szoros kapcsolatban van. A másik pedig a magasabb szintű problémákat oldja meg.

Az ilyen rendszerfelépítés tükrözi azt a tényt, hogy az elosztott intelligenciájú rendszerek egyre nagyobb gyakorlati fontosságot kapnak és alkalmazásuk a hatékonyságot jelentősen fokozhatóvá teszi.

Az elosztott intelligenciájú rendszerek problémái a közeljövő jelentős kutatási területét alkotják.

Lényegileg ebbe a témakörbe tartoznak az AC gépeket tartalmazó gyártórendszerek termelésprogramozási problémái is, amelyeket többek között a [5.1; 5.2; 5.3] munkák tárgyalnak.

A jelen értekezésnek nem témája az elosztott intelligenciájú rendszerek mélyebb elemzése. A következőkben csupán azt szeretnők fejtegetni, milyen hatással van a rendszerműködésre az on-line technológiai processzálás, vagy a 4. részben java-



5.2 ábra.

A technológiai tervezés és termelésirányítás elosztott intelligenciájú rendszerekben

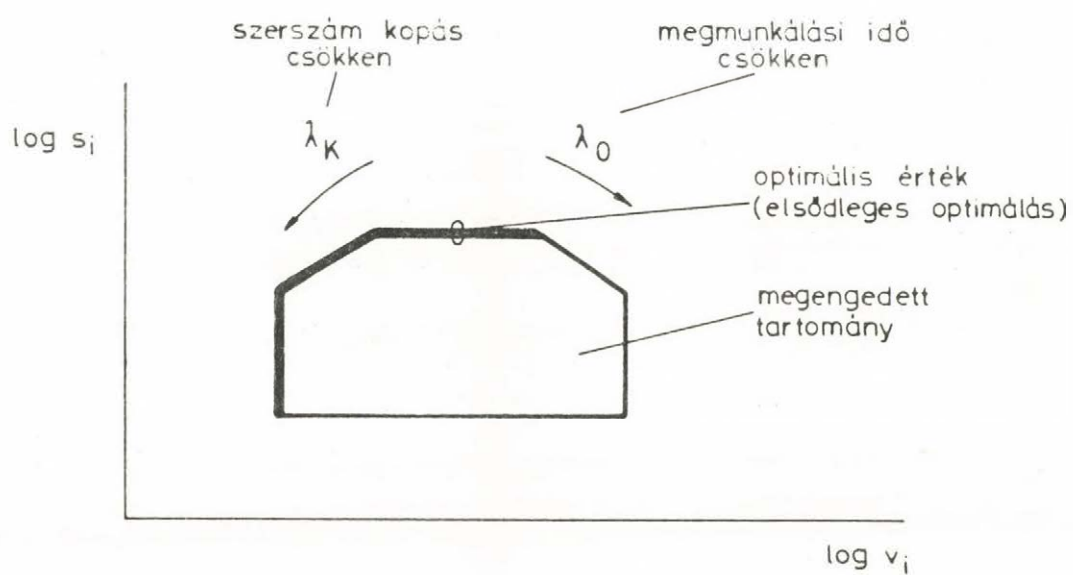
solt ACO rendszer alkalmazása.

5.1. Egy új felülírási /override/ elv

A 2. rész elemezte azt a kérdést, hogy hogyan lehet műveletelemek adatait optimálisan megválasztani. Ez a probléma gépipari rendszerek más szintjeinek követelményeit tekintetbe véve is megoldható. Az így megfogalmazott ún. másodlagos optimálási módszerek eredményei rendkívül érdekes következtetésekre nyújtanak módot hierarchikus gépipari rendszerek különböző körülmények közötti optimálásával kapcsolatosan.

Vizsgáljuk az 5.3. ábrát. Ez a valamely munkadarab megmunkálásához szükséges N művelet elem közül az i -edikre szemlélteti a forgácsolás megengedett tartományát.

Amikor az elsődleges optimálási problémát megoldjuk, akkor olyan forgácsolási adatokat határozunk meg, amelynek megfelelő pont a megengedett tartomány határának optimumesélyes részén van. Termelésirányítási követelmények megfogalmazásakor, majd az így keletkező másodlagos optimálási probléma megoldásakor az optimumot jellemző pontok, a megoldásként kapott λ_0, λ_k értékeknek megfelelően, az összes műveletelem-



5.3 ábra.

Egy új felülbírálási (override) elv

nél összehangoltan, az optimum esélyes határvonalon eltolódnak.

Mindezt a 2.3.2. pont részletesen tárgyalja. Az 5.3. ábra lényegileg a 2.2.9. ábrát ismétli meg.

Tételezzük fel, hogy a megmunkálás NC gépen /gépeken/ folyik és a vezérlő berendezés rendelkezik olyan opcióval, amely alkalmas a technológiai adatok on-line meghatározására.

Ezt a feladatot betöltheti az a javasolt ACO opció, amelynek működési elvét a 4.2.4.1. pont vázolta.

Ekkor azonban ez a berendezés nem többhurkos szabályozási rendszerként működik, hanem egyszerűen megkapja a technológiai tervezés megfelelő információit és erre szolgáló alrendszerek gyanánt számítja az optimális forgácsolási adatokat.

Ez az 5.2. ábrán vázolt megoldást realizáló rendszerkialakítás.. Természetesen más módon is realizálható, például a FANUC System P Modell D programozási állomás, a MAZATROL T-1, vagy más ezekhez hasonló berendezés megfelelő alkalmazásával.

Ilyen kiépítésű rendszer alkalmas arra, hogy termelésirányítási követelményeket "on-line" kielégítsen. Tehát, ha valamely gép iránti igény nagy /szűk keresztmetszet/, automatikusan megfelelő mértékben intenzívebb, optimális működésre képes.

Manipulálhatóvá teszi a szerszámkopásokat, lehetővé teszi a szerszámkimélést /kis terhelésű gépek esetében/. A fentiek szerint működő rendszer termelésirányítási szempontokra való adaptivitással rendelkezik.

Rendkívül érdekes lehetőségek nyílnak, amikor a fentiekhez képest az a különbség, hogy a megmunkáló gépet ténylegesen adaptív üzemmódban ACO rendszer irányítja.

Ekkor a technológiai adatok a pillanatnyi körülményektől függően állandóan optimális értékeket vesznek fel.

Az egész rendszer teljesen új tulajdonságokkal rendelkezik. Tételizzük fel, hogy a termelésirányítási szituáció olyan, hogy csökkenteni kell a megmunkálási időt. Ekkor valamely zérustól különböző λ_0 értéket megadva az ACO egység automatikusan "átrendezi" szabályozó köreinek működését ennek a célnak a realizálásához.

Az ACO opcióval ellátott irányító berendezés alkalmas az aktuális szerszám éltartamok és a munkadarabonkénti elhasználódás kijelzésére. Ez fontos termelésirányítási információ.

Amikor a termelésirányítási szempontok megkívánják a szerszámelhasználódásokkal való manipulációt

λ_k zérustól különböző értékek adhatók meg. Ezek hatására az ACO berendezés működése úgy alakul, hogy ezt a célt érvényesítse.

A vázolt működési mód bizonyos mértékig hasonlít az NC technikában alkalmazott felülbirálási /override/ lehetőségekhez, eljárásokhoz. Ezek alkalmazásakor a gépkezelő, a megmunkálási körülményektől függően, módosítja az előtolást, vagy a forgácsoló sebességet.

Amikor a megmunkálási folyamatot ACO egység irányítja, a fenti override módszer mintegy automatizálva van.

Ez a működés több is meg kevesebb is, mint a gépkezelő által való működtetés.

Több, mert az optimálás szempontjait érvényesíti, több, mert sok háttérinformációt használ, több, mert folyamatosan működhet stb.

Kevesebb, mert nehezebben hasznosítja a helyi tapasztalatokat, kevesebb, mert több információt igényel, kevesebb, mert az intuitív szempontokat nem érvényesíti stb.

Az új felülbirálási elv viszont olyan elemet visz be a rendszer működésébe, amely eddig csak a gépkezelő által nyújtott felülbirálattal volt megoldható. Nevezetesen a termelésirányítási szempontok folyamatos érvényesítését.

A gépkezelői override szerepe természetesen a biztonságos forgácsolás. Azonban termelésirányítási kihatásai kétségtelenek.

Az új override elv a termelésirányítási szempontokat explicite érvényesíti.

Fontos részletkérdés a megfelelő λ_0, λ_k értékek meghatározása. Erre mód nyílna off-line tervezési becsléssel, vagy kialakulhatnak megmunkálási tapasztalatokból. Ez a kérdés további kutatásokat érdemel.

Végül megfontolásra érdemes az a kérdés, hogy a technológiai folyamat új override lehetőségekkel ellátott ACO egységgel való irányítása az 5.2. ábrán bemutatott elosztott intelligenciájú rendszer olyan kialakítását teszi lehetővé, amely dinamikus, szabályozási rendszerekre jellemző működés elemeit új területekre terjeszti ki.

2.1. Függelék

Az egyes szakaszok lokális szélsőérték
pontjainak meghatározása

Jellemezze az optimumesélyes határvonal egyik
szakaszát az

$$s = D_j v^{N_j} = E_j n^{N_j}; \quad v = \frac{\pi d n}{1000} \text{ m/min} \quad /F21.1/$$

összefüggés.

A célfüggvény

$$K = \frac{C_M}{sn} \left(1 + \frac{C_T}{T} \right), \quad /F21.2/$$

ahol

$$T = \left(\frac{C_v}{y_{vs}^a x_v^b} \right)^{\frac{1}{m}} = \frac{C_1}{n^a s^b} \quad /F21.3/$$

ahol

$$C_1 = \left(\frac{1000 C_v}{\pi d a x_v} \right)^{\frac{1}{m}} = \text{konst.},$$

$$a = \frac{1}{m},$$

$$b = \frac{y_v}{m}.$$

A C_1 és a következőkben előforduló C_2, C_3, C_4 együtt-
hatók értékétől az itt közölt eredmények nem függnék.

Az /F21.1/, /F21.2/ és /F21.3/ egyenletekből

$$K = \frac{C_2}{n^{N_j+1}} \left(1 + \frac{C_T}{T} \right) \quad C_2 = \frac{C_M}{E_j}$$

$$T = \frac{C_3}{a+N_j b} \quad C_3 = \frac{C_1}{E_j b},$$

innen

$$K = C_4 (T^\alpha + C_T T^{\alpha-1}), \quad /F21.4/$$

ahol

$$\alpha = \frac{N_j + 1}{a + N_j b}$$

$$C_4 = C_M C_1^{-\frac{N_j+1}{a+N_j b}} E_j^{\frac{N_j+1}{a+N_j b}-1}$$

Az /F21.4/ függvényt T szerint deriválva kapjuk, hogy

$$\frac{\partial K}{\partial T} = C_4 \alpha T^{\alpha-1} + C_T (\alpha - 1) T^{\alpha-2}$$

A lokális szélsőérték pontban

$$\frac{\partial K}{\partial T} = 0,$$

ebből

$$\alpha T + C_T (\alpha - 1) = 0$$

és

$$T = T_{szj} = C_T \frac{1 - \alpha}{\alpha} = C_T \frac{a + N_j b - (N_j + 1)}{N_j + 1}.$$

Innen

$$T_{szj} = \frac{1 + y_v N_j - (N_j + 1)m}{m(N_j + 1)} C_T, \quad /F21.5/$$

vagy más alakban megadott határgörbe esetében, ha

$$N_j = - \frac{z_j}{y_j}$$

$$T_{szj} = \frac{y_j - y_v z_j - (y_j - z_j)m}{m(y_j - z_j)} C_T. \quad /F21.6/$$

Az /F21.5/ általános összefüggésből könnyen levezethetők a különböző határoló szakaszok szélsőértékpontjait meghatározó éltartamértékek.

A különböző előtoláskorlátoknak megfelelő vízszintes egyeneseken /s = konst./ az $N_j = 0$, tehát

$$T_{szs} = \left(\frac{1}{m} - 1 \right) C_T. \quad /F21.7/$$

Ha a forgácsolóerő értéke függ a sebességtől,

$$N_j = - \frac{z_F}{y_F},$$

ahol y_F és z_F az előtolás és a forgácsolási sebesség kitévője az erőegyenletben.

Ezért

$$T_{sz F} = \left[\frac{y_F - y_v z_F}{(y_F - z_F)^m} - 1 \right] C_T. \quad /F21.8/$$

Hasonló feltételezés mellett a teljesítménykorláton

$$N_j = - \frac{1 + z_F}{y_F},$$

ezért

$$T_{sz P} = \left[\frac{y_F - y_v(1 + z_F)}{(y_F - z_F - 1)^m} - 1 \right] C_T. \quad /F21.9/$$

Ez az érték, a gyakorlati esetekben, legtöbbször negatívnak bizonyul, ami mutatja, hogy a teljesítménykorlát legtöbbször nem tartozik az optimumesélyes határvonalhoz.

Állandó fordulatszám mellett, azaz a függőleges egyeneseken $z_j = 1$ és $y_j = 0$, tehát

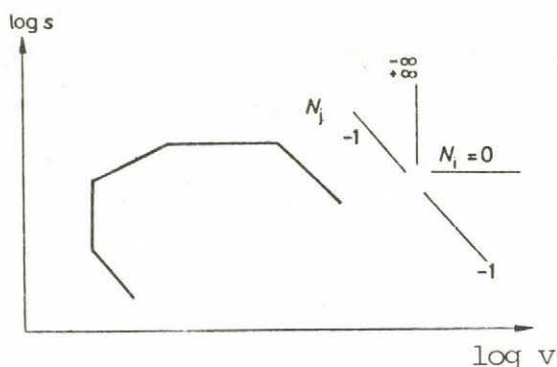
$$T_{szn} = \left(\frac{y_v}{m} \right) - 1 C_T. \quad /F21.10/$$

/Feltételezzük, hogy $y_v > m$. Amikor ez nem teljesül, azzal az esettel a 2.2. Függelék foglalkozik./

2.2. Függelék

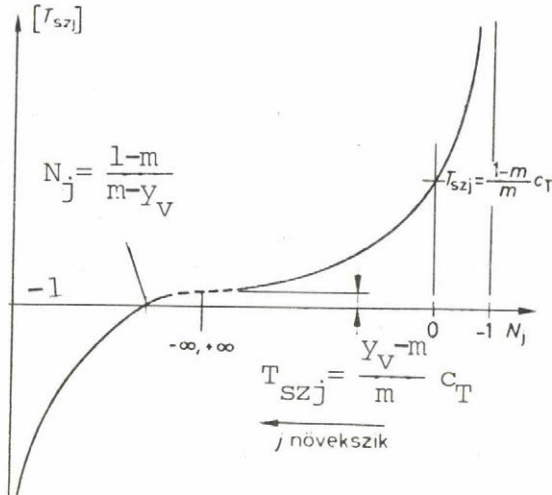
A szélsőérték pont unicitása /2. tétel/

Vizsgáljuk meg a lokális szélsőérték ponthoz tartozó éltartamérték alakulását az N_j meredekség függvényében. Megjegyezzük, hogy a log-log síkban az N_j meredekség az optimumesélyes határvonalon óramutató szerinti körbejáráskor $-1, -\infty, +\infty, 0, -1$ sorrendben és határok között változik /lásd a F22.1.ábrát/.



F22.1. ábra. Az optimum-esélyes határvonal szakaszainak meredeksége

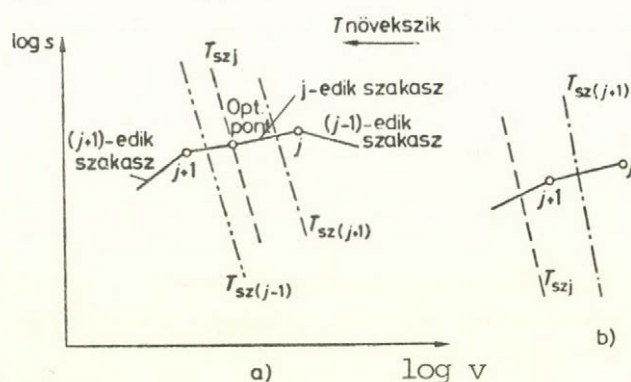
N_j ezen határok között való változásakor, az /F21.5/ összefüggés szerint meghatározott T_{szj} függvény alakulását az F22.2. ábra mutatja. A $T_{szj} = f(N_j)$ függvény meghatározása meglehetősen egyszerű, ennek részleteivel nem foglalkozunk /lásd [2.8]/. Az F22.2. ábrából látható, hogy a T_{szj} függvény monoton.



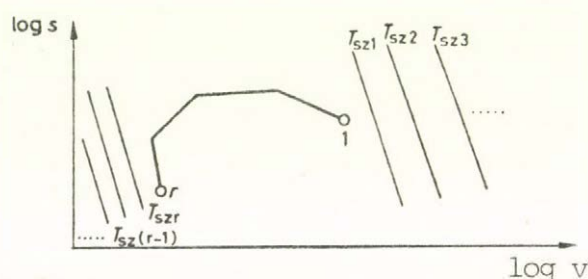
F22.2. ábra. A lokális szélsőértékhez tartozó éltartam a szakasz meredekségétől függően.

Ennek alapján belátható, hogy ha valamelyik szakaszon lokális szélsőérték pont van, akkor az ettől jobbra és balra levő szakaszokon nem lehet szélsőérték pont, hiszen az ezekre a szakaszokra vonatkozó optimális éltartamgörbék a j -edik szakaszhoz /lásd az F22.3a ábrát/ tartozó optimális éltartamhoz képest balra és jobbra fekszenek. Ez egyben azt is jelzi, hogy a célfüggvény értéke valamennyi szakaszon a j -edik szakasz felé haladva csökken.

Megtörténhet még, hogy a lokális szélsőérték pontok nincsenek az optimumesélyes tartomány egyik szakaszán sem, hanem mint az F22.3b ábra mutatja, közrefognak valamely határpontot. Ekkor világos, hogy ez a határpont az optimális.



F22.3. ábra. A lokális szélsőértékpontok elhelyezkedése az egyes szakaszokon



F22.4. ábra. A lokális szélsőértékponthoz tartozó éltartam görbék alakulása, amikor a legszélső pont az optimális

Végül, amikor az optimumesélyes határvonal leg-szélső pontjában van az optimális pont, akkor vala-mennyi lokális szélsőérték ponthoz tartozó éltartam-görbe e legszélső ponton kívül helyezkedik el, mint az F22.4. ábra mutatja. A fentiek bizonyítják a 2. tételt.

Megjegyezzük még, hogy mint az F22.2. ábrából látható, az

$$N_j = 1 \quad \text{és} \quad N_j = \frac{1 - m}{m - y_y}$$

érték között lokális szélsőérték pont nem létezhet / $T_{szj} \leq 0$ /. Ez a tény tovább szűkíti /bal oldalról/ az optimumesélyes határvonalat. Ezt az ismertetett optimálási algoritmus is tükrözi.

Amikor $y_v > m$, akkor az $N_j = \frac{1 - m}{m - y_v}$ érték negatív, amikor $y_v < m$, ez az érték pozitívvá válik. Ez mutatja azt, hogy ilyenkor az optimumesélyes határvonal óramutató járása szerinti körüljárásakor az $N_j = 0$ értéket megelőző első szakasz csak pozitív meredekségű lehet. Ezek szerint $v = \text{konst.}$ függőleges szakasz nem lehet optimumesélyes, amit az a tény is jelez, hogy ilyenkor az ehhez tartozó $T_{szj} = \frac{y_v - m}{m} C_T$ érték negatív.

2.3 Függelék

Másodlagos optimalítás

1. Legyen megadva a megmunkálási időre a következő korlátozás

$$t_{\Sigma} \leq t_m. \quad /F23.1/$$

Vezessük be a következő célfüggvényt

$$L = \sum_{i=1}^N C_M (t_i + C_{Ti} \frac{t_i}{T_i}) + \lambda \sum_{i=1}^N C_M (t_i - t_m). \quad /F23.2/$$

Mivel

$$t_i = \frac{\Delta L_i}{e_i n_i},$$

és tekintettel arra, hogy optimális pont csakis az optimum-esélyes határvonalon lehet, az /F23.2/ célfüggvény a 2.1 függelékhez hasonló módszert alkalmazva átalakítható az

$$L = \sum_{i=1}^N C_M C_L C_5 (T_i^L + C_{Ti} T_i^{L-1}) + \lambda \sum_{i=1}^N C_M C_L C_5 T_i^L - t_m \quad /F23.3/$$

alakra, ahol

$$C_L = \frac{\Delta L_i}{E_j},$$

$$C_5 = \left(\frac{d_i a^{x_{vi}} E_j^{y_{vi}}}{1000 C_{vi}} \right)^{\frac{1+N_j}{1+N_j y_{vi}}} m_i,$$

$$L_j = \frac{N_j + 1}{a_i + N_j b_i}.$$

Emlékeztetünk arra, hogy az i index a műveletelem sorszámát mutatja, míg a j index azt jelzi, hogy az ehhez a műveletelemhez tartozó feltételrendszer j -edik korlátozásának lokális szélsőértékpontját keressük /a j index tehát ij indexként értelmezendő/. E_j és N_j az $s_i = E_j n_i^{N_j}$ korlátegyenes paraméterei.

Az /F23.3/ összefüggésből a feltételes szélsőértékpontnak ki kell elégítenie az /F23.3/

$$\frac{\partial L}{\partial T_i} = 0 \quad /F23.4/$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_o} = 0 \quad /F23.5/$$

összefüggéseket. Az /F23.4/ összefüggésből kapjuk, hogy

$$T_i^{(\lambda)} = C_{Ti} \frac{1-L_j}{L_j (1+\lambda_o)} = C_{Ti} \frac{1+y_{vi} N_j - (N_j+1) m_i}{m_i (N_j+1) (1+\lambda_o)} = T_{szj} \frac{1}{1+\lambda_o}.$$

/F23.6/

Az /F23.5/ összefüggésből

$$\sum_{i=1}^N C_L C_5 T_i^{L_j}(\lambda_o) - t_m = 0 . \quad /F23.7/$$

Az /F23.6/ és /F23.7/ egyenletek alapján a következő másodlagos optimálási algoritmus alkalmazható:

- a/ $\lambda_o = 0$ értéknél megkapjuk az elsődleges optimalás adatait a korábban vázolt módon.
- b/ Kiszámítjuk az optimum-esélyes határvonal szakaszainak találkozási pontjaihoz tartozó $T_1, T_2, T_3 \dots$ éltartamokat.
- c/ Elkezdjük λ_o értékét növelni és az /F23.6/ egyenletből számított $T_i(\lambda_o)$ értéket behelyettesítjük az /F23.7/ összefüggésbe. Ennek során azonban állandóan figyelni kell, hogy mikor kerül át a technológiai adatokat meghatározó pont az egyes műveletelemeknél az optimum-esélyes tartomány egyik szakaszáról a másikra.

Ez a $T_i(\lambda_o)$ és a $T_1, T_2, T_3 \dots$ értékek összehasonlításával érhető el. Amikor a fenti esemény be következik, az egyenletekben az adott szakasz paraméterei (E_j, N_j) az új egyenes paramétereivel cserélendő fel. Amikor valamelyik műveletelemnél az optimum-esélyes határvonal szélsőpontjába értünk el ($T_{i \min}$), akkor ennél további változtatások nem lehetségesek. A változtatásokat fentmaradó műveletelemeknél kell folytatni. /F23.7/

Amikor az /F23.7/ egyenlet /adott hibával/ teljesül, az összes $T_i(\lambda_o)$ értékek ismertek.

Az optimális technológiai adatokat az optimum-esélyes határvonal $T_i(\lambda_o)$ értékek által meghatározott pontjaiban / $i = 1, 2, 3 \dots N$ / találjuk.

2. Legyen megadva valamely szerszám kopására a

$$\Delta_k \leq \Delta_{km} \quad /F23.8/$$

korlátozás. Mindkét kopásértéket a teljes éltartamhoz tartozó kopás hányadosaként értelmezzük.

Nyilvánvaló, hogy ez a korlátozás azoknak a műveletelemeknek a technológiai adataira hat, amelyekben az adott szerszám részt vesz. Mivel a többi művelet elem adatait az elsődleges optimálás szabja meg, vezessük be a következő célfüggvényt:

$$L = \sum_{i=S_{k-1}}^{S_k} C_M(t_i + C_{Ti} \frac{t_i}{T_i}) + \lambda_k C_M C_{Ti} (\sum_{i=S_{k-1}}^{S_k} \Delta_i - \Delta_{km}), \quad /F23.9/$$

ahol

$$\Delta_i = \frac{t_i}{T_i} = \frac{\Delta_{L_i}}{e_i n_i T_i}.$$

Az S_{k-1} és S_k indexek azt jelzik, hogy az összegezés azokra a műveletelemekre terjed ki, amelyeket az adott szerszám végez. Az előző ponthoz hasonló átalakítások után kapjuk, hogy

$$L = \sum_{i=S_k-1}^{S_k} C_M C_L C_5 T_i^{L_j} + C_{Ti} T_i^{L_j} + C_{Ti} T_i^{L_j-1} +$$

$$+ \sum_{i=S_k-1}^{S_k} C_M C_{Ti} C_L C_5 T_i^{L_j-1} - \Delta_{km}. \quad /F23.10/$$

A $\frac{\partial L}{\partial T_i} = 0$ és $\frac{\partial L}{\partial \lambda_k}$ feltételekből az előbbiekből

hez hasonlóan kapjuk, hogy

$$T_i^{(\lambda_k)} = C_{Ti} \frac{(1-L_j)(1+\lambda_k)}{L_j} =$$

$$= C_{Ti} \frac{[1+y_{vi} N_j - (N_j+1)m_i](1+\lambda_k)}{m_i(N_j+1)} = T_{szj}^{(1+\lambda_k)}$$

/F.23.11/

és

$$i = \sum_{i=S_k-1}^{S_k} C_L C_5 T_i^{L_j-1} (\lambda_k) - \Delta_{km} = 0. \quad /F.23.12/$$

Az optimálás algoritmus pontosa olyan, mint az előző pontban. Persze nyilvánvaló, hogy λ_k növelése ezuttal pontosan ellenkező irányba, a forgácsolás intenzitását csökkentő változásokat okoz.

Amikor több szerszámmra van megadva az /F23.8/-hoz hasonló feltétel, a fenti eljárás szerszámonként külön-külön elvégezhető.

3. Bonyolultabb az eset, amikor az /F23.1/ és /F23.8/ típusu korlátozásokat együttesen kell érvényesíteni, vagyis úgy akarunk rövidebb megmunkálási időt elérni, hogy eközben bizonyos szerszámok kopása is csökkenjen /nyilvánvalóan más szerszámok rovására/. Ilyenkor a feltételek lehetnek ellentmondásosak is, amely esetben a problémának nincs megoldása.

Célfüggvényül ekkor az /F23.2/ és /F23.9/ típusu összefüggések összege választandó. Belátható, hogy a

$$\frac{\partial L}{\partial T_i} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial \lambda_o} = 0, \quad \sum \frac{\partial L}{\partial \lambda_k} = 0$$

szükséges feltételekből a

$$T_{ik} = C_{Ti} \frac{[1 + y_{vi} N_j - (N_j + 1) m_i] (1 + \lambda_k)}{m_i (N_j + 1) (1 + \lambda_o)} = T_{szj} \frac{1 + \lambda_k}{1 + \lambda_o} \quad /F23.13/$$

$$\sum_{i=1}^N C_L C_{5T_{ik}}^{L_j} - t_m = 0, \quad /F23.14/$$

$$\sum_{i=S_{k-1}}^{S_k} C_L C_{5T_{ik}}^{L_j-1} - \Delta_{km} = 0 \quad /F23.15/$$

összefüggések vezethetők le, ahol az i index azt jelenti, hogy az i -edik műveletelemről van szó, amelyet a k -adik szerszám végez /az optimális ponthoz az i -edik művelet j -edik korlátozása által meghatározott éltartam tartozik.

Az utolsó összefüggésből annyi van, ahány szerszám kopására korlátozás van megadva, tehát ahány λ_k szorzót a célfüggvényekbe bevezettünk.

A feladat most is az /F23.13/, /F23.14/ és /F23.15/ egyenletrendszer megoldása.

Ennek során az 1. alatt vázolt algoritmus változatlan módon alkalmazható, mert az /F23.15/ összefüggésekben egyedül az

$$\frac{1+\lambda_k}{1+\lambda_0} = K_k$$

ismeretlen mennyiségek szerepelnek. A K_k változók az egyes egyenletekből meghatározhatók, pontosan ugyanolyan módon, mint az előző esetekben. Ezekből meghatározhatók a T_{ik} értékek azokra a művelet-elemekre, amelyek kopására korlátozások érvényesek. Így az /F23.14/ összefüggésben csak az

$$\frac{1}{1+\lambda_0}$$
 érték marad ismeretlen, amely szintén a vá-

zolt módon határozható meg.

4. Amikor lehetőség nyílik a megmunkálási idő növelésére és így a szerszámkopás csökkentésére, az 1. alatt vázoltak változatlanul alkalmazhatók. A /2.70/ típusu korlátozáskor λ_0 értéke 0 és -1 érték között változik.

3.1. Függelék

A fogásosztás optimálása dinamikus programozással

Amikor rögzített fogásmélység mellett vizsgáljuk a forgácsoló megmunkálás optimális paramétereinek megválasztási módját, az optimális megmunkálási költség - adott átmérő megmunkálása esetében - a fogásmélység - mint paraméter - függvényeként adódik, éspedig

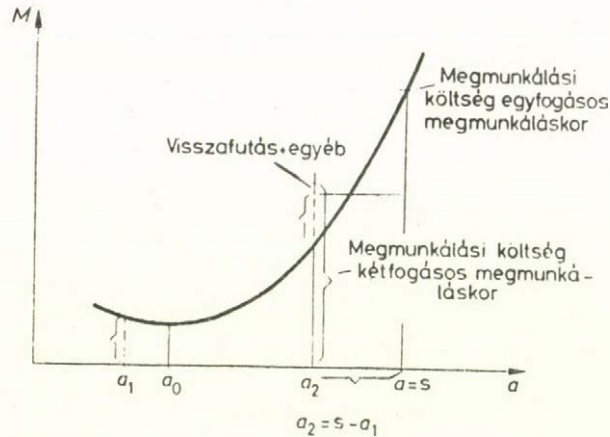
$$K = K(a, d)$$

alakban. Itt d a megmunkálás előtti átmérő. /A megmunkálás utáni átmérő $d - 2a$. / Természetesen az optimális előtolás és sebesség is „ a ” függvénye, azaz $s(a)$ és $v(a)$, K explicitebb alakja, tehát

$$K = K[a, s(a), v(a), d]. \quad /F31.1/$$

Tételezzük fel, hogy $K(a, d)$ szigorúan konvex függvény az $a \geq a_{\min} > 0$ tartományban. /Ahol a_{\min} minimális tekintetbe veendő fogásmélység./

Ekkor - ha a járulékos költségeket nem tekintjük - van olyan minimális nagyságu ráhagyás, amelyet két "lépcsőben", két fogással már olcsóbban távolíthatunk el, mint egyetlen fogással /F31.1. ábra/.



F31.1. ábra. A megmunkálási költség alakulása a ráhagyás egy vagy két fogásban való eltávolításakor

Vagyis, valamely R ráhagyás értéket fel tudunk osztani úgy a_1 és $R - a_1$ részekre, hogy az ezekkel a fogásokkal való megmunkálás összköltsége kisebb, mint R egy fogásban való eltávolításáé. Nyilvánvaló, hogy ez csak az $R > a_0$ értékekre fordulhat elő. Ezen a tényen az sem változtat, hogy a két fogással való megmunkáláskor a tekintetbe veendő átmérők különbözőek, mert a viszonylag kis átmérőváltozástól az optimális technológiai adatok kismértékben függnak, így az összefüggések jellege nem változik.

a/ Amikor a ráhagyást egynél több fogással távolítjuk el, a célfüggvényt /3.1/ alakban kell tekintetbe venni.

Megemlítjük, hogy rögzített „a” mellett a /3.1/ függvény ugyanazon $s(a)$, $v(a)$ párra veszi fel minimumát, mint a

$$K = \frac{\Delta LC_M}{sn} \left(1 + \frac{C_T}{T} \right) \quad /F31.2/$$

függvény, hiszen a két célfüggvény egymástól csak egy s -től, v -től és a -tól is független additív állandóban különbözik. Mivel a /3.1/-ben a két additív tag közül csak az egyik tartalmazza ΔL -et, így a meggondolásainkból adódó számszerű értékek ΔL -től függhetnek!

b/ Fizikai-forgácsolási okok miatt a fogásmélység nem lehet nagyobb egy megadott $a_{\max} > a_{\min}$ értéknél. Ez azt jelenti, hogy a_{\max} -nál nagyobb ráhagyást egyetlen fogással semmiképp sem távolíthatunk el. Adott ráhagyás esetén tehát a /3.1/ alatti költségfüggvény figyelembe vételével - az optimalizáláskor el kell döntenünk, hogy hány fogással tudjuk minimális összköltség árán elvégezni a megmunkálást, és mekkorának kell választani optimálisan az i -edik a_i fogásmélységet / $i = 1, 2, \dots, N$ /, továbbá ehhez milyen optimális $s_i(a_i)$, ill. $v_i(a_i)$ tartozik. Megjegyezzük, hogy az a_i / $i = 1, 2, \dots, N$ / ráhagyások egyben meghatározzák a forgácsolás d_1, d_2, \dots, d_N átmérőit is, ahol $d_1 = d$, $d_N = D + 2a_N$ / D a megmunkálás utáni átmérő/.

Tétel:

A fent leirt több fogásos forgácsoló megmunkálásra érvényes a Bellmann-féle optimálási elv, azaz: Az optimális stratégia a rendszer minden közbülső állapotára is optimális, függetlenül attól, honnan került a rendszer ebbe az állapotba.

E tétel szerint a teljes R ráhagyást

$$(R = \frac{d - D}{2})$$

a következő módon kell optimálisan eltávolítani:

- először $a_1 \leq R$ fogásmélységgel eltávolítunk egy $a_{\min} \leq a_1 \leq a_{\max}$ vastagságú réteget, éspedig a /3.1/ költségfüggvény alapján számított optimális $s_1(a_1)$ előtolás, $v_1(a_1)$ sebesség és $K(a_1, d)$ költséggel;

- a maradék $R - a_1 \geq 0$ ráhagyást $a_2, a_3, \dots, s_2(a_2), s_3(a_3), \dots, s_n(a_n); v_2(a_2), v_3(a_3), \dots, v_n(a_n)$ optimális stratégiával és ennek figyelembevételével adódó optimális $K(R - a_1; d - 2a_1)$ összköltséggel távolítjuk el;

- a_1 -et a fenti tétel alapján úgy kell megválasztani, hogy

$$K(a_1; d) + K(R - a_1; d - 2a_1)$$

minimális legyen.

Megemlítjük, hogy az $(R - a_1)$ maradék ráhagyás eltávolítására a stratégia ugyanaz, mint R eltávolítására.

A gyakorlatban a fogásmélység az a_{\min} és a_{\max} határok között, a felbontóképesség által meghatározott diszkrét lépcsőkben változtatható. Mint említettük, ez a tény jól felhasználható a fentiekben leírt optimális stratégiát realizáló algoritmus kidolgozására. A konkrét számításoknál, a numerikus munka reális korlátok között való tartása érdekében, elégséges megfelelően kis értékű diszkrét fogáslépcsőket tekintetbe venni.

A diszkrét algoritmus felépítése a folytonos esethez hasonlóan az /F31.2/ összefüggés alapján úgy történik, hogy a K érték már rendelkezésre álljon a_1 optimálásakor. Ezért fordítva, a megmunkálás utánra előírt D átmérőből indulunk ki és ehhez számítjuk ki mindazon fogásmélységek, átmérők és az ezekhez tartozó K optimális költségek halmazát, amelyeknél az egyetlen fogásos megmunkálás az optimális. Ezek ismeretében, az /F31.2/ képlet alapján meg tudjuk határozni mindazon átmérők halmazát, amelyre a kétfogásos megmunkálás az optimális stb., mindaddig, amíg el nem érünk a d átmérőig.

IRODALOM

- [1.1] A gépgyártás-technológia fejlődési irányainak prognózisa 2000-ig. OMFB tanulmány. 1980. nov. 4-8001-T.
- [1.2] The AM award M.E. Merchant American Machinist. 1980. December. p. 90.
- [1.3] Gépgyártás-technológiai folyamatok optimalása. OMFB tanulmány. 1980. február. 4-7702-ET.
- [1.4] A Collège International pour l'Étude Scientifique des Techniques de Production Mecanique /C.I.R.P./ "Delphi-type Forecast of the Future of Production Engineering" című anyagot ismer-tető 19-7101 It. OMFB tanulmány. /1971/.
- [1.5] B. Colding, L. V. Colwell, D. N. Smith: Delphi Forecast of Manufacturing Technology. SME. January 1979.
- [1.6] M. E. Merchant: Analysis of Existing Technologi-cal Forecast Concerning the Computer-Integrated Automatic Factory. Ann. CIRP. Vol. 29/2/ 980.

- [2.1] Rezek Ö.: Investigation of linear force equations when cutting steel. Periodica Politechnica, 1972.
- [2.2] Г. К. Горанский, Ф. В. Владимиров, Л. Н. Ламбин: Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ. Машиностроение, Москва, 1970.
- [2.3] Horváth M.: Módszer egyélű forgácsolószerszámok éltartamának számítására. Gépgyártástechnológia, 1967. 12. szám.
- [2.4] E.I.A. Armarego, R. H. Brown: The machining of metals. Prentice Hall, New York, 1969.
- [2.5] FORTAP nyelvleírás. SPE. 1975.
- [2.6] Bálint Lajos: A forgácsoló megmunkálás tervezése. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
- [2.7] Справочник технолога машиностроителя. Т.2. Машиностроение, Москва, 1972.
- [2.8] Somló J., Girnt M., Gyürki J., Laufer J.: Optimalizáló adaptív szerszámgép irányítási rendszerek. MTA SZTAKI Közlemények. 1973. No. 5.
- [2.9] Szvoboda, M., Tóth T.: A TAUPROG TE esztergálási programrendszer. COMPCONTROL'72, Sopron, 1972.
- [2.10] Tóth T., Vadász D., Perger G.: A TAUPROG rendszer jellemzői és az ipari alkalmazás tapasztalatai. TECHNOS'75, Budapest, 1975.

- [2.11] Tóth T.: A forgácsolási paraméterek számítógépes optimálása esztergálás esetére a megmunkáló rendszer rugalmas deformációjából származó hiba figyelembevételével. Kandidátusi értekezés. Budapest, 1976.
- [2.12] А. О. М. Этин, М. С. Городетский, Б. Л. Шимяцкий, Е. Й. Складневская: Расчет режимов резания для обработки на металлорежущих станках. Вестник Машиностроения 1972. № 5,7.
- [2.13] Somló J.: Analitikus optimálás. MTA SZTAKI Közlemények, 1974. № 27.
- [2.14] E. I. A. Armarego, R. H. Brown: The machining of metals, Prentice Hall, 1969.
- [2.15] G. L. Ravignani: The significance of the productivity function in machining economics. CIRP, 1975. 24. szám, p. 7-11.
- [2.16] M. Y. Friedman, V. A. Tipnis: Cutting rate-tool life characteristic functions for material removal processes. Trans. ASME, 1976. B98, № 2, p. 481-495.
- [2.17] J. Kotuč: Určenie optimalnej trvanlivosti reznej hrany nástroja. Strojnický Časopis, 30, 1979. Č. 1.
- [2.18] Tóth T., Cser I.: Forgácsolástechnológiák számítógépes tervezése és programozása. Gépipari Technológiai Intézet Kiadvány 1981. június

- [2.19] H.J. Jacobs: Optimális forgácsolás. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [2.20] Pálmai Z.: Fémek forgácsolhatósága. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
- [2.21] А. Д. Макаров: Оптимизация процессов резания. Машиностроение. Москва, 1976.
- [2.22] Р.А. Кюттнер: Разработка и исследование методики определения оптимальных режимов механической обработки. Кандидатская диссертация. ЛИТМО. 1971.
- [2.23] н.м. Капустин: Разработка технологических процессов обработки деталей на станках с помощью ЭВМ. Машиностроение. Москва, 1976.
- [2.24] M. Field, A. F. Ackenhausen: Determination and analysis of machining costs and production rates using computer techniques. Air Force Machinability Center. Cincinnati. 1968.
- [2.25] Somló J., Nagy J.: A new approach to cutting data optimization. PROLAMAT, Stirling, 1976. /Preprint/ Advances in Computer-Aided Manufacture. North Holland. 1977.
- [2.26] R. J. Duffin, E. L. Peterson, C. M. Zener: Geometric Programming. Wiley. 1967.

- [2.27] B. Colding-W. König: Validity of the Taylor-Equation in Metal Cutting CIRP An. XIV. p. 793-812, 1971.
- [2.28] Е. м. Тыгу - Й. М. Шарашкин: Стохастический модел процесса механической обработки, ПТНИИ М., 1970.
- [2.29] к. х. Тинн - Е. М. Тыгу: Технологические расчеты на ЦВМ. Машиностроение, Ленинград, 1968.
- [2.30] Iwata K., Murotsu Y., Iwatsubo T., Fujii S.: A Probabilistic Approach to the Determination of the Optimum Cutting Conditions, ASME Paper N^o 72-Prod-7.
- [2.31] Machining Data Handbook, Machinability Data Center, Metcut Research Associates Inc., Cincinnati, Ohio, 1972.

- [3.1] Puskás L., Mokry J. F., Bolla L.: Az integrált anyag- és adatfeldolgozó rendszerek telepítése, célfüggvényei. /Kézikönyv - kézirat/ GTI. Budapest, 1981.
- [3.2] Gépgyártástechnológiai folyamatok optimalítása. OMFB tanulmány. 4-7702-ET. 1980. febr.
- [3.3] dr. Horváth, Mátyási, Mészáros, Szegh: Forgácsolt alkatrészek műveleti sorrendjének számítógépes tervezése. Kis és középsorozatgyártás automatizálása. Győr, 1977. okt.4-8.
- [3.4] dr. Horváth M., BME-GTI kutatócsoport: Forgácsolt alkatrészek megmunkálási sorrendjének számítógépes tervezése. /Rendszerterv/ Kutatási jelentés MK-6-1635-75.
- [3.5] dr. Horváth M., BME-GTI kutatócsoport: Forgácsolt alkatrészek megmunkálási sorrendjének számítógépes tervezése /primer sorrend/. Kutatási jelentés 274.011/76.
- [3.6] dr. Horváth M., BME-GTI Kutatócsoport: Forgácsolt alkatrészek megmunkálási sorrendjének számítógépes tervezése /Gyártóberendezés választás/. Kutatási jelentés, 274.011/76K-132655
- [3.7] В. Д. Цветков: Многошаговый метод проектирования с помощью ЭВМ операционных технологических процессов. "Автоматизация умственного труда в машиностроении" Наука. Москва, 1969.

- [3.8] R. Bellman: Dynamic programming. Princeton University, Princeton, 1975.
- [3.9] Frey T., Somló J.: Az optimalizáló adaptív szerszámgépirányítás néhány problémája. Mérés és Automatika, 1974. 5. szám.
- [3.10] Frey T., Nagy J., Somló J.: Programcsomag az optimális fogásosztás meghatározására eszterga típusu megmunkálásoknál. Compcontrol'74, Szeged.
- [3.11] Somló J., Molnár B. E., Mészáros I., Nagy I., Szelke E., Kranczler M., Mohácsi D., Szántai D.: Integrált termelésirányító, információs és döntési rendszerek adatbázisainak kialakítása.
- MTA SZTAKI, BME Gépgyártástechnológia Tanszék.
Kutatási jelentés 1981.

- [4.1] F. Marossy, P. Szász: On an Experimental system for Adaptive Control Optimization of Machine Tools. MANUFACONT'80. Budapest, 1980. okt.
- [4.2] Somló J., Marossy F., Szász P.: Programozható több funkciós konverter, különösen optimalizáló adaptív szerszámgépirányító berendezésekhez. Magyar szabadalom, NSZO jelzete: GO5B17/00, GO5B 19/18
- [4.3] Б.С. Балакшин /ед./: Адаптивное управление станками. Машиностроение, Москва, 1973.
- [4.4] Horváth M., Somló J.: A forgácsoló megmunkálások optimalizálása és adaptív irányítása. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- [4.5] Japan develops untended machines. American Machinist. 1981. January.
- [4.6] Somló J.: Gondolatok az automatizálásról a forgácsoló technológiában. A 4. EMO szerszámgép világkiállítás néhány tapasztalata. Mérés és Automatika, N^o=5, 6.
- [4.7] Самонастраивающиеся станки. Под ред. (szerk.) Б. С. Балакшин. Машиностроение. 1965, 1967, 1970 /1. 2. és 3. kiadás/
- [4.8] В. Н. Подураев: Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. Машиностроение. 1977.

- [4.9] З. Ш. Гейлер: Самонастраивающиеся системы адаптивного контроля. Машиностроение, Москва, 1978.
- [4.10] R. Bedini, F. Mancuso, F. Petti, P. C. Pinotti: Development of an adaptive constrained control for a computerized numerical control: software interactions and conflicts. MANUFACONT'80. Budapest, 1980.
- [4.11] P. Mc Goldrick, C. Boyd: Pet-the adaptive transducer. Systems International. March. 1981.
- [4.12] O. Masory, Y. Roren: Adaptive Control System for Turning. An. CIRP. Vol 29/1/1980.

- [5.1] Takeyama, M., H. Suzuki, F. Kabayasi, etc.
/1973/ DAM: Data Communication Manufacturing
System of Adaptive Controlled Machining Center.
XIV. MTDR. Conf., Manchester.
- [5.2] E. M. Frost-Smith: Optimization of the Machining
Process and Overall System Concepts. Ann. CIRP.
Vol. XVIV. 1971.
- [5.3] Girnt M., Szelke E.: Adaptive Control in Produc-
tion Scheduling. MANUFACONT'80. Budapest, 1980.
okt.
- [5.4] Somló J.: On a new Override Principle for
Adaptively Controlled /AC/ Machine Tools.
MANUFACONT'80. Budapest. 1980.
- [5.5] Somló J., Horváth M.: On the Hierarchical
Systems, Optimization and Adaptive Control of
Machine Tools, IFAC VIII World Congress.
Kyoto. 1981.

- [OMFB 1] A forgácsolás adaptív vezérlésének stratégiája és megoldásai
Tanulmány. 1976. május /4-74-02-It/
- [OMFB 2] Technológiai eljárások és számszerű adataik megválasztásának korszerű módszerei a gép-
iparban
Konceptiótervezet 1976. december /4-7502-Kt/
- [OMFB 3] A számítógéppel segített mérnöki tervezés
szolgáltató rendszerei és hazai alkalmazásuk
Tanulmány. 1977. március
- [OMFB 4] Integrált anyag- és adatfeldolgozó rend-
szerekkel kapcsolatos kutatási és fejlesztési feladatok
Tanulmány. 1977. május /4-7601-T/
- [OMFB 5] Országos jelentőségű géptervezés-fejlesztési feladatok és koordinálásuk
Tanulmány. 1979. január /4-7716-Et/
- [OMFB 6] Irányítástechnikai rendszerek számítógéppel segített tervezése
Tanulmány. 1979. szeptember /16-7705-It/
- [OMFB 7] A számítógéppel segített műszaki tervezés
elterjesztésének főbb céljai 1990-ig
Konceptiótervezet. 1980. február /16-7602-Kt/
- [OMFB 8] Gépgyártástechnológiai folyamatok optimalása
1980. február /4-7702-Et/

A TANULMÁNSOROZATBAN 1981-BEN MEGJELENTEK:

- 116/1981 Sieglér András: Egy 6 szabadságfokú antropomorf manipulátor kinematikája számítógépes vezérlése
- 117/1981 Knuth Előd – Radó Péter: Principles of Computer Aided System Description
- 118/1981 Demetrovics János – Gyepesi György: Általános függőségek és lekérdezéssel kapcsolatos algoritmusok relációs adatmodellekben
- 119/1981 Sztanó Tamás: REAL–TIME programrendszerek eseményvezérelt szervezése
- 120/1981 Szentgyörgyi Zsuzsa: A számítástechnika műszaki fejlődése és társadalmi hatásai
- 121/1981 Vicsek Tamásné (Strehó Mária) : Vizsgálatok a kezdeti érték problémák numerikus megoldásával kapcsolatban
- 122/1981 Andó Györgyi – Lipcsey Zsolt: Sztochasztikus Ljapunov módszerek és alkalmazásaik
- 123/1981 Márkus Zsuzsanna: Intelligens interaktív rendszerek elvi problémái
- 124/1981 Márkus Zsuzsanna: Logikai alapú programozási módszerek és alkalmazásaik számítógéppel segített építészeti tervezési feladatok megoldásához
- 125/1981 Fabók Julianna: Software implementációs nyelvek
- 126/1981 Várszegi Sándor: Multimikroszámítógépes-rendszerek
- 127/1981 Lipcsey Zsolt: N-személyes minőségi differenciáljátékok késleltetéssel és késleltetés nélkül
- 128/1981 Böszörményi László: Multa-task rendszerek fejlesztése magasszintű nyelven
- 129/1981 Tóth János: A formális reakciókinetika globális determinisztikus és sztochasztikus modelljéről és néhány alkalmazásáról

A TANULMÁNYSOROZATBAN 1982-BEN MEGJELENTEK:

- 130/1982 Barabás Miklós — Tőkés Szabolcs: A lézer printer képalkotás hibái és optikai korrekciójuk
- 131/1982 RG-II/KNVVT "Szisztemü upravlenija bazani dannüh i informacionnue szisztemü" Szbornik naucsno-iszszledovatel'szkih rabot rabocsej gruppü RG-II KNVVT, Bp. 1979. Tom I.
- 132/1982 RG-II/KNVVT Tom II.
- 133/1982 RG-II/KNVVT Tom III.
- 134/1982 Knúth Előd — Rónyai Lajos: Az SDLA/SET adatbázis lekérdező nyelv alapjai (orosz nyelven)
- 135/1982 Néhány feladat a tervezés-automatizálás területéről. Örmény-magyar közös cikkgyűjtemény (orosz nyelven)

Feladatok kiadó: Hencsey Gusztáv
82. 10., Do-408 Szolnoki Nyomda

1982 DEC 2 7